



**JOANA ALEXANDRA
BASÍLIO MARTINS**

**Projeções futuras do vento, vento de corte e
helicidade na Península Ibérica.**

**Future projections for wind, wind shear and helicity
in the Iberian Peninsula.**



**JOANA ALEXANDRA
BASÍLIO MARTINS**

**Projeções futuras do vento, vento de corte e
helicidade na Península Ibérica**

**Future projections for wind, wind shear and helicity in
the Iberian Peninsula.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e da Atmosfera, realizada sob a orientação científica do Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha, Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor José Manuel Henriques Castanheira

Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Cristina Maria Mendes Andrade

Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Tomar

Prof. Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha

Professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Professor Doutor Alfredo Rocha que orientou a minha dissertação e esteve sempre disponível a ajudar mesmo durante os restantes anos de universidade.

Um especial agradecimento à Susana Cardoso e à Carolina Viceto que foram uma ajuda imprescindível e que perderam o seu tempo a ajudar-me no desenvolvimento do trabalho e que muito me ensinaram.

À minha família, que sempre me incentivaram a chegar aqui e que embora não percebendo nada de meteorologia, sempre se mostraram interessados em saber as coisas que aprendi durante estes anos.

Aos meus colegas com quem aprendi muito e que tornaram todo este percurso muito mais fácil.

E ao meu cão, o Romeu, que me fez companhia nestes últimos meses em casa a fazer a dissertação e que fez questão de me levar a passear todos os dias para ir fazendo as minhas pausas nos estudos.

palavras-chave

Alteração climática, vento, vento de corte, helicidade, corrente de jato, eventos extremos, Península Ibérica

resumo

Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar as alterações climáticas esperadas para o final do século em algumas cidades da Península Ibérica de acordo com o cenário RCP8.5, relativamente à intensidade e direção do vento, intensidade do vento de corte e helicidade. Foram realizadas simulações com o modelo WRF e as condições iniciais e de fronteira foram obtidas a partir de simulações realizadas com o MPI-ESM-LR e as reanálises ERA-Interim. Os dados simulados foram corrigidos por aplicação de *Bias Correction* antes de serem utilizados na análise.

Os resultados mostram que no futuro espera-se uma diminuição da intensidade do vento à superfície e aos 850hPa. Aos 300hPa espera-se uma redução da intensidade do vento durante os meses de verão e um ligeiro aumento nos restantes meses. Contudo, nesses restantes meses, espera-se um aumento significativo no número de ocorrências de eventos extremos, principalmente a norte de Portugal. Para o vento de corte (dos 0 aos 6 km) é esperado um aumento de intensidade durante todo o ano, exceto nos meses mais quentes, principalmente a sul de Portugal. O aumento esperado para o norte de Portugal ocorrerá principalmente em eventos de maior duração e intensidade. Relativamente à helicidade, espera-se que esta aumente principalmente nos meses de verão e na região de sudoeste da Península Ibérica, com maior ênfase para eventos de maior duração e intensidade.

keywords

Climate change, wind, wind shear, helicity, jet stream, extreme events, Iberian Peninsula.

abstract

This work was carried out with the objective of studying the climatic changes expected for the end of the century for some cities in the Iberian Peninsula for the RCP8.5 scenario, regarding wind intensity and direction, wind shear intensity and helicity. The WRF model was used with initial and boundary conditions obtained from simulations previously performed with the MPI-ESM-LR and the ERA-Interim reanalysis. Bias Correction was applied to simulated data prior to the analysis.

The results of this work show that in the future a reduction in the intensity of the wind at the surface and at 850hPa is expected. For the 300hPa, it is expected a decrease in the wind intensity during the summer months and a slight increase in the remaining months. However, in these remaining months, a significant increase in the number of occurrences of extreme events is expected, mainly in the north of Portugal. For the wind shear (from 0 to 6 km) an intensity increase is expected throughout the year, except in the warmer months, mainly south of Portugal. The expected increase for the north of Portugal will occur mainly in events of greater duration and intensity. As for helicity, it is expected to increase mainly in the summer months and in the southwest region of the Iberian Peninsula, with a greater emphasis on events of longer duration and intensity.

Índice

Índice	1
Índice de figuras	3
Índice de tabelas	5
Índice de anexos	6
Índice de símbolos	7
Índice de acrónimos	8
Capítulo 1 Introdução	11
1.1 – Objetivos da dissertação	13
1.2 – Estrutura da dissertação	13
Capítulo 2 Revisão bibliográfica	15
2.1 – Alterações climáticas	15
2.1.1 – Intensidade e direção do vento à superfície e em altitude	15
2.1.2 – Variação do vento em altitude e eventos extremos	16
Capítulo 3 Fundamentos teóricos	19
3.1 – Vento de corte e hodógrafo	19
3.2 – Helicidade relativa à tempestade	21
Capítulo 4 Dados e métodos	23
4.1 – Dados	23
4.1.1 – Descrição do modelo WRF	23
4.1.2 – Descrição das simulações	24
4.2 – Métodos	27
4.2.1 – <i>Bias Correction</i>	27
4.2.2 – Teste t-Student	31
4.2.3 – Comparação entre as médias dos climas histórico e futuro	32
4.2.4 – Alteração climática na intensidade e direção do vento	32
4.2.5 – Comparação anual dos eventos extremos de cada clima	33
4.2.6 – Comparação dos eventos extremos de cada clima por estação do ano e por região	34
4.2.7 – Período de retorno	35
Capítulo 5 Alteração climática	39
5.1 – Vento à superfície	39

5.1.1 – <i>Boxplots</i>	40
5.1.2 – Frequência da direção e intensidade do vento	41
5.1.3 – Rosa dos ventos	44
5.2 – Vento na atmosfera livre	46
5.2.1 – Intensidade do vento aos 850 hPa	46
5.2.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa	47
5.3 – Vento de corte e helicidade	49
5.3.1 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)	49
5.3.2 – Helicidade (0-3 km)	50
5.3.3 – Hodógrafo	51
Capítulo 6 Eventos extremos	53
6.1 – Comparação anual dos eventos extremos de cada clima	53
6.1.1 – Intensidade do vento aos 850 hPa	53
6.1.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa	54
6.1.3 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)	55
6.1.4 – Helicidade (0-3 km)	56
6.2 – Comparação dos eventos extremos de cada clima por estação do ano e por região	56
6.2.1 – Intensidade do vento aos 850 hPa	56
6.2.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa	58
6.2.3 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)	59
6.2.4 – Helicidade (0-3 km)	61
6.3 – Comparação dos períodos de retorno dos eventos extremos em ambos os climas	62
6.3.1 – Intensidade do vento aos 850 hPa	63
6.3.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa	63
6.3.3 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)	64
6.3.4 – Helicidade (0-3 km)	65
Capítulo 7 Conclusões e discussão	66
Referências Bibliográficas	69
Websites	73
Anexos	75

Índice de figuras

Figura 1 Relação entre a rotação do vento geostrófico na vertical e da advecção de temperatura: (a) Backing e (b) Veering, onde V_{g0} é o vetor do vento geostrófico num nível inferior, V_{g1} é o vetor vento geostrófico num nível superior, VT é o vetor do vento térmico, T é a temperatura média da camada delimitada pelos dois níveis e δT é representa a variação horizontal da temperatura média da camada. (Fonte: Holton & Hakim, 2013)	19
Figura 2 Barbela de vento e vetor do vento (à esquerda). Hodógrafo - Projeção do vento horizontal em vários níveis em coordenadas podares (à direita).	20
Figura 3 Sistema de coordenadas verticais eta. (Fonte: Skamarock et al., 2008)	23
Figura 4 Domínio do modelo utilizado na implementação regional WRF, com resoluções de 81, 27 e 9 km. (Fonte: Marta-Almeida et al. (2016))	24
Figura 5 Gráfico do ajuste Q-Q. As CDFs do vento médio são apresentadas para as reanálises ERA-Interim (1986-2005), Clima histórico simulado não corrigido (1986-2005), clima futuro simulado não corrigido (2080-2099) e clima futuro simulado corrigido (2080-2099).....	29
Figura 6 Climatologia anual para o vento zonal médio (m/s) (à esquerda) e para a helicidade (à direita), para reanálises ERA-Interim, clima histórico simulado não corrigido e clima histórico simulado corrigido.....	30
Figura 7 CDFs do vento zonal médio (m/s) (à esquerda) e da helicidade (à direita), para reanálises ERA-Interim, clima histórico simulado não corrigido e clima histórico simulado corrigido.	30
Figura 8 Gráficos Q-Q para a relação entre dados das reanálises ERA-Interim e dados da simulação para o clima histórico não corrigido. À esquerda encontra-se o gráfico para o vento zonal (m/s) e à direita encontra-se o gráfico para a helicidade.....	31
Figura 9 Divisão da área de estudo por regiões (esquerda). Matriz representativa dos tipos de eventos extremos possíveis, considerando a sua intensidade e duração (direita).	35
Figura 10 Gráficos Boxplot para Lisboa (esquerda) e Madrid (direita) da intensidade do vento à superfície, para cada mês dos climas histórico (boxplot da esquerda para cada mês) e futuro (boxplot da direita para cada mês). É mostrada a mediana '-', intervalo inter-quartil (retângulo azul) e outliers '+'.	41
Figura 11 Intensidade e frequência do vento para cada mês e direção, para Lisboa e Madrid para o clima histórico (esquerda) e diferenças (%) futuro-histórico (direita).....	42
Figura 12 Rosa dos ventos para o vento à superfície, para os climas histórico (esquerda) e futuro (direita), para Lisboa (cima) e Madrid (baixo).....	45
Figura 13 Hodógrafos para as cidades de Lisboa (esquerda) e Madrid (direita) dos 0 aos 6 km, para o clima histórico (azul) e para o clima futuro (vermelho).....	51
Figura 14 Duração média (horas) dos eventos extremos da intensidade do vento aos 850 hPa (esquerda) e o número de eventos extremos por ano (direita), para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades.	54
Figura 15 Duração média (horas) dos eventos extremos da intensidade do vento aos 300 hPa (esquerda) e o número de eventos extremos por ano (direita), para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades.	54

Figura 16 Duração média (horas) dos eventos extremos de intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km (esquerda) e o número de eventos extremos por ano (direita), para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades.....	55
Figura 17 Duração média (horas) dos eventos extremos de helicidade dos 0 aos 3 km (esquerda) e o número de eventos extremos por ano (direita), para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades.	56
Figura 18 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a intensidade do vento aos 850 hPa.	63
Figura 19 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a intensidade do vento aos 300 hPa.	64
Figura 20 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km.	64
Figura 21 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a helicidade dos 0 aos 3 km.	65

Índice de tabelas

Tabela 1 Altitude (m) e pressão (hPa) aproximadas correspondentes a cada nível eta.....	25
Tabela 2 Lista de cidades a considerar na dissertação, juntamente com a sua latitude e longitude, em graus.....	26
Tabela 3 Intensidade do vento médio mensal e anual à superfície para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).	40
Tabela 4 Intensidade do vento médio mensal e anual aos 850 hPa para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).	47
Tabela 5 Intensidade do vento médio mensal e anual aos 300 hPa para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).	48
Tabela 6 Intensidade do vento de corte médio mensal e anual dos 0 aos 6 km para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).....	49
Tabela 7 Helicidade média mensal e anual dos 0 aos 3 km para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).	50
Tabela 8 Número de eventos extremos da intensidade do vento aos 850 hPa para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).	57
Tabela 9 Número de eventos extremos da intensidade do vento aos 300 hPa para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).	58
Tabela 10 Número de eventos extremos da intensidade do vento de corte entre os 0 e 6 km para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).....	60
Tabela 11 Número de eventos extremos da helicidade entre os 0 e 3 km para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).	62

Índice de anexos

Figura A1 Gráficos Boxplot para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid) da intensidade do vento à superfície, para cada mês dos climas histórico (boxplot da esquerda para cada mês) e futuro (boxplot da direita para cada mês). É mostrada a mediana ‘-’, intervalo inter-quartil (rectângulo azul) e outliers ‘+’.....	75
Figura A2 Intensidade e frequência do vento para cada mês e direção, para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid) para o clima histórico (esquerda) e diferenças (%) futuro-histórico (direita).....	79
Figura A3 Rosa dos ventos para o vento à superfície, para os climas histórico (à esquerda) e futuro (à direita), para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid).	87
Figura A4 Hodógrafos para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid) dos 0 aos 6 km, para o clima histórico (azul) e para o clima futuro (vermelho).....	95
Figura A5 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a intensidade do vento aos 850 hPa.	98
Figura A6 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a intensidade do vento aos 300 hPa.	99
Figura A7 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km.	100
Figura A8 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a helicidade dos 0 aos 3 km.	101
Figura A9 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a intensidade do ventos aos 850 hPa.	102
Figura A10 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a intensidade do ventos aos 300 hPa.	111
Figura A11 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km.....	120
Figura A12 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a helicidade dos 0 aos 3 km.	129

Índice de símbolos

\vec{S}	Vento de corte
∂	Derivada Euleriana (local)
\vec{V}	Vento
v	Componente meridional do vento
u	Componente zonal do vento
w	Componente vertical do vento
\vec{C}	Velocidade da tempestade
$\vec{\omega}$	Vorticidade relativa
ω_c	Vorticidade cruzada
ω_h	Componente horizontal da vorticidade relativa
ω_s	Vorticidade <i>streamwise</i>
∇	Gradiente
η	Coordenadas verticais <i>eta</i>
p_h	Pressão hidrostática
p_{ht}	Pressão hidrostática no topo do domínio do modelo
p_{hs}	Pressão hidrostática à superfície
p_i	Simulação do futuro corrigida
o_i	Observações ou Reanálises
s_{fi}	Simulação do futuro não corrigida
s_{ci}	Simulação do histórico não corrigida
IQR	Intervalo inter-quartil (percentil 75 – percentil 25)

Índice de acrónimos

ARW	Versão do WRF para investigação Advanced Research WRF
CAPE	Energia Potencial Disponível para Convecção Convective Available Potential Energy
CDF	Função de distribuição cumulativa Cumulative distribution Function
CIMP5	Fase 5 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
EA	Padrão do Atlântico Este East Atlantic pattern
ECMWF	Centro Europeu de Previsão do tempo a médio prazo European Center for Medium-Range Weather Forecasts
ERA-Interim	Reanálises do ECMWF a partir de 1979 ECMWF Reanalysis since 1979
GCM	Modelos Climáticos Globais Global Climate Models
IPCC	Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas Intergovernmental Panel on Climate Change
RCP	Cenários representativos de concentração Representative Concentration Pathways
MPI-ESM-LR	Modelo do Sistema Terrestre do Instituto Max-Planck – baixa resolução Max-Planck Institute Earth System Model – low resolution
NAO	Oscilação do Atlântico Norte North Atlantic Oscillation
NMM	Modelo da Mesoescala Não-Hidrostático Nonhydrostatic Mesoscale Model
PDF	Função densidade de probabilidade Probability Density Function
SREH	Helicidade relativa à tempestade Storm Relative Helicity
UNEP	Programa para o Ambiente das Nações Unidas

	United Nations Environment Programme
WMO	Organização Mundial de Meteorologia World Meteorological Organization
WRF	Modelo de Previsão e Investigação do Tempo Weather Research and Forecasting Model
WPS	Sistema de Pré-processamento do WRF WRF Preprocessing System

Capítulo 1 | Introdução

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia (WMO), o clima descreve a estatística do tempo para uma localização particular e para um determinado período de tempo. O período de tempo clássico definido pela WMO para estudar o clima é de 30 anos. Em 1988, a WMO e o Programa para o Ambiente das Nações Unidas (UNEP) criaram o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), com o objetivo de que este fornecesse aos governos, a todos os níveis, informações científicas que pudessem ser usadas para desenvolver políticas de adaptação e mitigação. Os relatórios do IPCC são uma ferramenta fundamental para as negociações internacionais sobre as alterações climáticas.

Segundo o IPCC, as alterações climáticas são mudanças no estado do clima que podem ser identificadas através de alterações na média, variabilidade ou estatísticas de ordem superior, das suas propriedades, e que persistem durante um período de tempo extenso (décadas ou superior). As mudanças do clima podem ocorrer devido a causas naturais, como é o exemplo do fenómeno El Niño, ou devido a causas antropogénicas.

A influência do Homem no sistema climático é notória. As emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa, causadas pelo grande crescimento económico e populacional, tem aumentado desde a era pré-industrial e neste momento, são as maiores de sempre. Isto levou a concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nítrico, que não têm precedentes nos últimos 800.000 anos. Os efeitos das elevadas concentrações de gases com efeito de estufa na atmosfera, juntamente com outros impulsores antropogénicos, foram detetados ao longo do sistema climático e são altamente prováveis de terem sido a causa dominante do aquecimento global observado desde meados do século XX. As mudanças observadas no aquecimento do sistema climático são inequívocas e desde os anos 50, muitas das mudanças observadas, são inéditas desde décadas a milénios. A atmosfera e os oceanos aqueceram, a cobertura de neve e gelo diminuiu, e o nível médio do mar subiu (IPCC, 2014). Em muitas regiões verificaram-se alterações na precipitação e no derretimento de neve e gelo, o que levou à alteração dos sistemas hidrológicos, afetando as reservas de água em termos de quantidade e qualidade. Muitas espécies terrestres, de água doce e marinhas deslocaram geograficamente os seus habitats, mudaram as suas atividades sazonais, os seus padrões de migração e a sua interação com outras espécies (IPCC, 2014).

As alterações climáticas associadas ao vento podem ter consequências em vastas áreas. Alterações na intensidade média do vento podem influenciar a evapotranspiração potencial e por consequência, a disponibilidade de água no solo, podendo contribuir para secas (McVicar et al., 2008). Períodos de tempo prolongados de vento em latitudes médias podem originar a subida do nível do mar nas regiões costeiras (McInnes et al., 2009), enquanto que períodos prolongados de tempo em que prevalece uma determinada direção de vento, pode causar mudanças nas ondas e na estabilidade costeira (Pirazzoli & Tomasin, 2003). Os ventos em altitude e a sua variação vertical pode afectar a aviação. Há ainda outras propriedades do vento que podem influenciar o desenvolvimento de tempestades. A posição da corrente de jacto nas latitudes extra-tropicais é determinante no desenvolvimento de tempestades. O vento é hoje considerado um recurso energético relevante numa economia em transição de energias fósseis para energias renováveis. Por isto mesmo, é necessário investigar as projecções futuras do vento, associadas à alteração climática resultante de emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa.

Contudo, apesar das alterações nos comportamentos médios do clima, é necessário considerar também as mudanças em outras propriedades estatísticas, nomeadamente nos eventos extremos. Intensidades de vento extremas são uma ameaça à segurança do Homem, atividades marítimas, à aviação e à integridade das infraestruturas (IPCC, 2012). Um evento extremo pode

ser identificado quando uma variável atmosférica (por exemplo a precipitação ou o vento) excede um determinado limite (*threshold*), que pode ser definido entre valores baseados em percentis, valores absolutos fixos ou ainda períodos de retorno. Nem todos os eventos extremos têm necessariamente impactos extremos. Um evento de tempo ou clima extremo varia de lugar para lugar (por exemplo, um dia de calor extremo em Portugal terá temperaturas diferentes de um dia de calor extremo no Brasil), e a sociedade tende a adaptar-se à gama de valores históricos para a intensidade dos eventos extremos (WMO, 2015).

Desde 1950 têm sido observadas alterações em muitos eventos extremos. Algumas destas alterações estão associadas à influência humana, incluindo o decréscimo de baixas temperaturas e o aumento de altas temperaturas. É ainda exemplo o aumento de episódios num número de regiões de precipitação extrema (IPCC, 2014). Ventos extremos à superfície estão fortemente associados a tempestades de circulação estruturada (Donat et al., 2010a). Uma tempestade intensa pode combinar ventos e precipitação extremos. Já a falta de vento por períodos de tempo prolongados também é considerada um evento de clima extremo, que pode levar à acumulação exagerada de poluição urbana (McBean, 2006).

Ao contrário de outras variáveis atmosféricas como por exemplo a temperatura, os ventos extremos são muitas vezes considerados num contexto de fenómenos extremos, que muitas vezes estão associados a ciclones tropicais e extratropicais, tempestades, *downbursts* (movimento forte de ar em direção à superfície, normalmente proveniente de uma nuvem cumulonimbus) e tornados (IPCC, 2012). Embora o vento não seja utilizado para definir por si mesmo um evento extremo (Peterson et al., 2008), um limite associado à sua intensidade pode ser utilizado para caracterizar a severidade de um fenómeno, como é o exemplo da escala de Saffir-Simpson para classificar ciclones tropicais.

É evidentemente sugerido um aumento de ventos extremos em ciclones tropicais no futuro e vários estudos à escala regional suportam a teoria do aumento do risco de tempestades associadas ao vento durante os meses de inverno na Europa devido à alteração na rota das tempestades (Boldingh Debernard & Petter Røed, 2008; Donat et al., 2011; Donat et al., 2010a; Donat et al., 2010b; Pinto et al., 2007; Sterl et al., 2009). Contudo, os Modelos Climáticos Globais (GCMs), considerando a sua atual resolução espacial, são incapazes de resolver fenómenos de pequena escala, como é o exemplo de tornados e tempestades convectivas de mesoescala, que estão associados a ventos severos, apesar destes ventos terem intensidades superiores ao 99º percentil (McInnes et al., 2011).

Segundo o IPCC, no relatório “*Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*” (IPCC, 2012), é referido que vários estudos recentes observam mudanças na intensidade do vento em várias zonas do globo. Contudo, devido a várias deficiências associadas aos dados dos anemómetros e à inconsistência entre anemómetros e reanálises em algumas regiões, o IPCC têm pouca confiança nas projecções futuras do vento e na sua origem. Têm também pouca confiança em como as tendências da média da intensidade do vento observadas se relacionam com as tendências de ventos extremos. Por último, há ainda falta de confiança em projecções para fenómenos de pequena escala como os tornados porque processos físicos concorrentes podem afetar tendências futuras e porque os modelos climáticos (globais) não simulam tais fenómenos. Deste modo, torna-se premente melhorar a incerteza de projecções climáticas, nomeadamente aquelas relacionados com o vento.

Muitos aspetos associados às alterações climáticas e os impactos associados a estes irão prolongar-se por séculos, mesmo que as emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa parem. O risco de mudanças abruptas ou irreversíveis aumenta com o aumento da magnitude do aquecimento global. A adaptação e mitigação são estratégias necessárias para reduzir e gerir os riscos das alterações climáticas (IPCC, 2014).

1.1 – Objetivos da dissertação

Esta dissertação tem como principal objetivo fazer uma comparação entre o clima histórico (1986-2005) e o clima futuro (2080-2099) a uma escala regional (26 cidades da Península Ibérica), tendo em conta algumas variáveis derivadas do vento: intensidade, direção, vento de corte e helicidade. Para a projeção do clima futuro, é utilizado o cenário de emissões de gases RCP8.5 em simulações realizadas pelo modelo climático regional.

A análise da intensidade e direção do vento permite estimar as alterações relativamente ao clima histórico que ocorrerão à superfície, como por exemplo uma alteração na intensidade média do vento, e uma alteração na direção predominante do vento. Além disso, é ainda possível estudar as alterações que ocorrerão em altitude, como por exemplo uma alteração na posição e intensidade da corrente de jato. Já o vento de corte e a helicidade relativa à tempestade (SREH) permitem perceber como será a variação do vento em altitude, possibilitando estimar a frequência de ocorrência de tempestades motivadas por movimentos verticais intensos.

1.2 – Estrutura da dissertação

No segundo capítulo da dissertação é realizada a revisão bibliográfica onde é feita referência à problemáticas das alterações climáticas a nível global e regional. Foi dada ênfase às variáveis analisadas neste trabalho e foi feita referência aos trabalhos já existentes nesta área.

No capítulo 3 são expostos os fundamentos teóricos necessários à compreensão do trabalho desenvolvido. É apresentada a forma de calcular cada uma das variáveis utilizadas, e é ainda explicada a relação que as variáveis têm com a formação e caracterização de tempestades.

No quarto capítulo encontram-se explicados os dados e os modelos utilizados na realização do trabalho. É explicada também a metodologia adotada para a validação dos modelos bem como os cálculos efetuados ao longo do trabalho.

Nos capítulos 5 e 6 são expostos e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. O capítulo 5 refere-se à alteração climática, onde é feita uma comparação direta entre o clima histórico e o clima futuro. No capítulo 6 são analisados os eventos extremos, mais uma vez fazendo a comparação entre os climas histórico e futuro.

Por fim, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas considerações a desenvolver em trabalhos futuros.

Capítulo 2 | Revisão bibliográfica

2.1 – Alterações climáticas

O aumento contínuo das emissões de gases com efeito de estufa de origem humana determinam maioritariamente o aquecimento global do presente século e futuramente. É esperado que a temperatura à superfície aumente durante o século 21 tendo por base todos os cenários de emissões. A alteração da temperatura global à superfície esperada para o século 21 (2081-2100), relativamente a 1850-1900 provavelmente excederá os 1.5°C, para o cenário RCP4.5 e é esperado que este aumento exceda os 2°C para os cenários RCP6.0 e RCP8.5. É muito provável que as ondas de calor venham a ocorrer mais vezes e que sejam mais duradouras (IPCC, 2014).

As alterações na precipitação não serão uniformes. Em muitas regiões secas a latitudes médias e subtropicais, a precipitação média deverá diminuir, ao contrário de muitas regiões húmidas a latitudes médias onde a precipitação média deverá aumentar, para cenários inferiores ao RCP8.5. Já os eventos de extrema precipitação sobre a maioria das regiões a médias latitudes e zonas tropicais húmidas aumentaram de intensidade e frequência, com o aumento da temperatura à superfície (IPCC, 2014).

“A região sul da Europa é uma das regiões do mundo mais vulneráveis às alterações climáticas” (Soares et al., 2015). O aumento da temperatura à superfície causará um aumento na frequência, intensidade e duração das ondas de calor na Europa. No final do século 21, os países do norte da Europa terão o mesmo número de dias quentes que atualmente têm os países na região sul da Europa. A intensidade de temperaturas extremas aumentará mais rapidamente que a intensidade de temperaturas moderadas sobre a zona interior do continente Europeu devido ao aumento da variabilidade da temperatura (Beniston et al., 2007). Precipitações intensas no inverno aumentarão na região central e norte da Europa, ao contrário da região sul onde diminuirão. Já as precipitações intensas de verão aumentarão na região noroeste da Europa, e diminuirão na região sul. As secas no mediterrâneo começarão mais cedo no ano, e durarão mais tempo (Beniston et al., 2007). A intensidade de ventos extremos entre 45°N e 55°N aumentará exceto na região sul dos Alpes, e tornar-se-á mais de noroeste do que atualmente. Estas alterações estão associadas á redução da pressão ao nível do mar, levando a mais tempestades no Mar do Norte e um correspondente aumento de *storm surges* ao longo da costa da Holanda, Alemanha e Dinamarca, em particular (Beniston et al., 2007).

2.1.1 – Intensidade e direção do vento à superfície e em altitude

Muitos estudos têm revelado uma diminuição da intensidade do vento à superfície, em várias regiões (Bichet et al., 2012). Na Europa, são vários os países onde se verifica esta redução, como é o caso de França (Najac et al., 2009), República Checa (Brázdil et al., 2009), Holanda (Cusack, 2013), Turquia (Dadaser-Celik & Cengiz, 2014), Espanha e Portugal (Vicente-Serrano et al., 2014). Alguns estudos vieram a comprovar que as causas associadas à diminuição da intensidade do vento à superfície podem estar associadas à alteração da temperatura do ar (Dadaser-Celik & Cengiz, 2014), aumento de emissão de aerossóis (Bichet et al., 2012) e ainda alterações nos padrões de circulação de larga escala e de escala regional (Holt & Wang, 2012), como por exemplo a Oscilação Norte-Atlântica (Earl et al., 2013; Jerez et al., 2013; Wan et al., 2010).

Um dos motivos pelo qual se estuda as mudanças esperadas na intensidade do vento para um cenário de clima futuro é a utilização de energia eólica. Segundo Carvalho et al. (2017), é

esperado um aumento na fonte de energia eólica na Europa Central (Mar Báltico e áreas vizinhas) e um decréscimo na região do Mediterrâneo principalmente no final do presente século e sob cenários de forte forçamento radiativo. É ainda esperado um aumento da variabilidade intra-anual no Mar Báltico e áreas vizinhas e um decréscimo na região do Mediterrâneo, contudo não se encontram alterações na variabilidade intra-anual significantes para as restantes regiões da Europa.

É de especial interesse estudar as consequências das alterações climáticas no que diz respeito à corrente de jato, uma vez que esta dita rotas de aviação e tempos de voo principalmente nos voos transatlânticos. Os modelos climáticos indicam um desvio de 1° para norte e um pequeno aumento da intensidade da corrente de jato até 2100 (Irvine et al., 2016). Num outro estudo Peings et al. (2017) identificam respostas contrastantes dependendo da estação do ano e da longitude. No inverno, identificou-se um abrandamento da corrente de jato e um aumento da sua ondulação, sobre a América do Norte, enquanto que sobre a Europa é verificado um aumento na intensidade da corrente e uma diminuição na ondulação. Enquanto que o aquecimento da alta troposfera tropical desloca a corrente de jato para norte, no inverno, com a amplificação do Ártico e um enfraquecimento do vórtice polar, encontra-se o efeito oposto. A posição e intensidade da corrente de jato é fundamental no desenvolvimento de depressões extra-tropicais à superfície.

2.1.2 – Variação do vento em altitude e eventos extremos

É possível encontrar alguns estudos para o século 21 relativamente a eventos extremos em Portugal relacionados com variações na temperatura e na precipitação. Contudo, ainda não existe muita informação sobre a ocorrência de ventos extremos ou tempestades associadas a forte vento de corte e helicidade. Foram encontrados dois estudos que vão de encontro ao que se pretende fazer neste trabalho e que podem complementar os resultados da dissertação.

O primeiro estudo revela que, projeções para o século 21 indicam um aumento robusto do vento de corte entre junho e novembro para a região tropical do Oceano Atlântico e Pacífico Este. No Mar das Caraíbas, o Atlântico Norte Tropical e o Pacífico Este Tropical, o vento de corte aumenta entre 0.5 a 1 m/s por cada °C de aquecimento global. As alterações no vento de corte sobre o Oceano Atlântico estão relacionadas com mudanças no vento zonal na alta troposfera (Vecchi & Soden, 2007).

O segundo estudo apresenta uma comparação preliminar entre a simulação para o século 21 do CCSM3 (Community Climate System Model 3) e o cenário de emissão A2 do IPCC para o século 20. É indicado um ligeiro aumento do CAPE (energia potencial disponível para convecção) na estação fria, uma ligeira diminuição na estação quente e uma pequena variação no vento de corte médio. Contudo, há um pequeno aumento de ambientes favoráveis a eventos severos na maioria das localizações resultante do aumento do CAPE e do vento de corte. Regiões próximas do Mar Mediterrâneo experienciam um aumento no CAPE e nos ambientes favoráveis a eventos severos (Viceto et al., 2017), enquanto que regiões ao longo do norte da Europa apresentam poucas alterações (Marsh et al., 2009).

Segundo o IPCC, no relatório “Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation” (IPCC, 2012), normalmente existe pouca confiança em projeções relacionadas com ventos extremos porque ainda existem poucos estudos e porque há algumas deficiências provenientes das simulações para este tipo de evento. Contudo existe a exceção da velocidade máxima média esperada para os ciclones tropicais, que é provável que aumente, mas não em todas as bacias oceânicas. É também provável que a frequência dos ciclones tropicais

diminua ou se mantenha igual. Relativamente a eventos extremos como é o caso da ocorrência de tornados, existe pouca confiança nas projeções deste fenómeno uma vez que a sua escala é muito pequena quando comparada à escala dos modelos climatológicos globais. Sabe-se que existirá um desvio em direção aos polos da rota das tempestades às médias latitudes devido a forçamentos antropogénicos.

Capítulo 3 | Fundamentos teóricos

3.1 – Vento de corte e hodógrafo

O vento de corte é uma variável que representa a variação do vento horizontal ao longo da vertical. A sua origem pode estar relacionada com a presença de um gradiente horizontal de temperatura (vento térmico) e com instabilidade de origem dinâmica, como por exemplo a turbulência e o atrito.

O vento de corte é calculado pela seguinte equação:

$$\vec{S} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (1)$$

Onde \vec{V} representa o vento horizontal e z representa a altitude. Normalmente o vento de corte é calculado entre as altitudes 0 e 3 km ou 0 e 6 km. Neste estudo considera-se o vento de corte para 0-6 km.

O vento de corte direcional representa a variação (em graus) da direção do vetor velocidade do vento em altitude. O vento de corte de intensidade da velocidade informa sobre a variação da intensidade do vento em altitude (m/s).

O vento de corte pode estar associado a uma rotação no sentido horário do vento em altitude (*veering*) ou a uma rotação no sentido anti-horário (*backing*). Para um vento de corte associado ao vento térmico (Figura 1), *veering* representa advecção de ar quente e *backing*, advecção de ar frio.

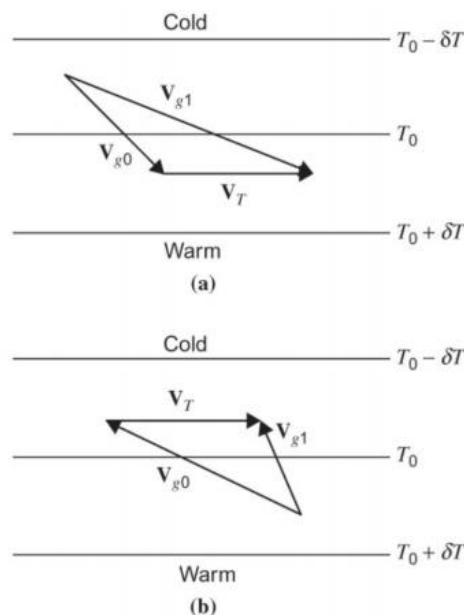


Figura 1 Relação entre a rotação do vento geostrófico na vertical e da advecção de temperatura: (a) *Backing* e (b) *Veering*, onde V_{g0} é o vetor do vento geostrófico num nível inferior, V_{g1} é o vetor do vento geostrófico num nível superior, V_T é o vetor do vento térmico, T é a temperatura média da camada delimitada pelos dois níveis e δT é representada a variação horizontal da temperatura média da camada. (Fonte: Holton & Hakim, 2013)

Esta variável é normalmente apresentada graficamente com o auxílio de um hodógrafo. O hodógrafo é um gráfico que representa a projeção num plano horizontal do vento horizontal em vários níveis de altitude, em coordenadas polares (Figura 2). Através da forma apresentada pelo hodógrafo, podemos estimar quantitativamente a probabilidade de desenvolvimento de tempestades multicélulas, supercélula e tornados.

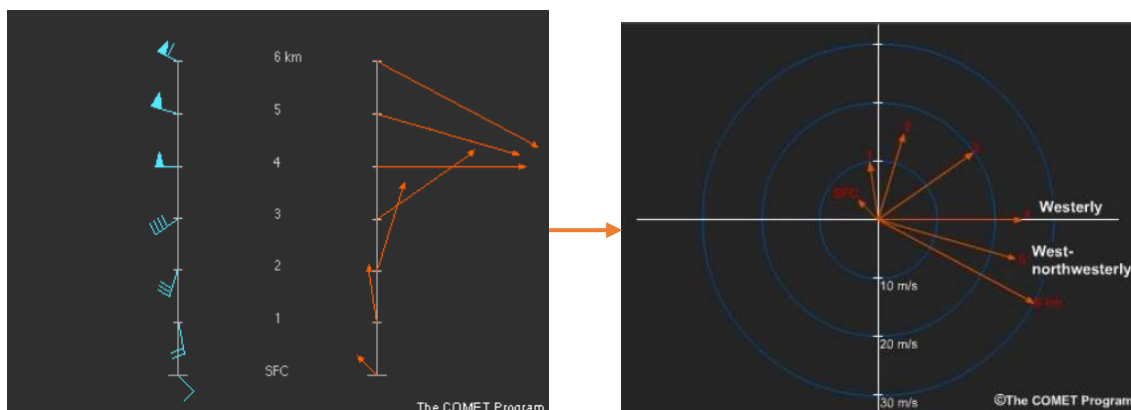


Figura 2 Barbela de vento e vetor do vento (à esquerda). Hodógrafo - Projeção do vento horizontal em vários níveis em coordenadas polares (à direita).

Por vezes define-se o vento de corte direcional como sendo a variação (em graus) do vetor do vento de corte \vec{S} em altitude. Esta definição diz se o hodógrafo é:

- Linear - \vec{S} não varia de direção em altitude;
- Curvo - \vec{S} varia direção em altitude podendo ser *backs* (roda no sentido anti-horário) *veers* (roda no sentido horário).

O vento de corte direcional pode ainda referir-se à variação (em graus) da direção do (vetor) velocidade do vento em altitude, medidos em relação à tempestade.

No início da formação da tempestade, esta move-se com o vento médio 0-6 km. Este vento médio deve ser calculado pela média pesada pela pressão, do vento em cada nível. Quando a tempestade já está numa fase mais madura, esta move-se, geralmente, para a direita do vento médio e deve ser estimada por imagens de radar ou satélite. Na ausência desta informação utiliza-se o vento médio da camada 0-6 km.

Vento de corte intenso é importante para o desenvolvimento de tempestades severas. Um aumento significativo na intensidade do vento com a altitude irá provocar uma ascensão de ar (*updraft*) na tempestade. Isto permite que o *updraft* e o *downdraft* (descida de ar) ocorram em zonas distintas da tempestade. O *downdraft* não irá anular o *updraft*, pelo contrário, irá reforçá-lo. A presença de ventos fortes na alta troposfera irá evacuar as massas de ar do topo do *updraft* reduzindo assim a precipitação e sustentando o *updraft*. Vento de corte direcional na baixa troposfera irá ajudar na iniciação do desenvolvimento de um *updraft* rotativo. Esta é uma componente importante no desenvolvimento de mesociclones e de tornadogénese. Ventos fortes na baixa troposfera associados a vento de corte direcional irão gerar valores elevados de helicidade, o que aumenta a ameaça de tornado quando se desenvolve uma tempestade. O vento de corte ambiente é importante para se determinar o tipo de tempestade. Enquanto que a estabilidade e a humidade ajudam a determinar a intensidade da precipitação da tempestade, o vento de corte determina o movimento da tempestade e o seu tempo de vida.

Num caso de fraca intensidade e rotação do vento de corte, a tempestade mover-se-  lentamente e terá um curto tempo de vida. O *downdraft* anular  o *updraft*, diminuindo a tempestade. Não é esperado tempo severo. No caso de forte intensidade e fraca rotação do vento de corte, temos uma situação que é denominada de vento de corte não direcional. A intensidade do vento de corte permitirá   tempestade deslocar-se, o que fará com que dure mais tempo. Uma vez que a tempestade se desloca, permite que outras tempestades se desenvolvam na sua periferia. Normalmente são criados sistemas de convecção de mesoescala. Ao fim de algum tempo, resulta numa linha de tempestades (*squall line*). Estas tempestades provocam inicialmente precipitação fraca, pequenos tornados e forte precipitação quando associadas a tempo severo. Quando estamos na presença de fraca intensidade e forte rotação do vento de corte, como a intensidade é fraca, a rotação perde importância e o resultado obtido será idêntico ao do primeiro caso. Por último, quando a intensidade e rotação do vento de corte são fortes, estamos na situação de possibilidade de formação de supercélulas. Esta é a situação que melhor promove um *updraft* rotativo. A intensidade do vento de corte permite que a tempestade se mova rápido e cria um *updraft* separado do *downdraft*. Já a rotação do vento de corte permite que o *updraft* rode dentro da tempestade. Estas tempestades podem produzir granizo grande, fortes tornados e precipitação intensa (Haby, 2019).

3.2 – Helicidade relativa à tempestade

Para avaliar a interacção entre o ambiente e a tempestade, torna-se mais relevante estudar a velocidade do vento (\vec{V}) ambiente relativamente à velocidade da tempestade (\vec{C}).

A velocidade de propagação de uma tempestade (\vec{C}) pode ser determinada com auxílio de imagens de s t lite ou radar, mas também   possível obter uma boa estimativa da mesma calculando a velocidade média da camada (por exemplo 0-6 km).

A helicidade é uma grandeza que qualifica o movimento de rotação helicoidal do *updraft*.

A helicidade integrada na vertical entre z_1 e z_2 (tipicamente 0-3 km)  :

$$SREH = \int_{z_1}^{z_2} |(\vec{V} - \vec{C})| \omega_s dz = \int_{z_1}^{z_2} \hat{k} \cdot |(\vec{V} - \vec{C})| \times \vec{S} dz \quad (2)$$

Onde ω_s   a vorticidade *streamwise* (no sentido do movimento da tempestade) e \vec{S}   o vento de corte. A vorticidade *streamwise* pode ser obtida através da equação da vorticidade relativa ($\vec{\omega}$), representada abaixo.

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \hat{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \hat{j} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \hat{k} \quad (3)$$

Se o gradiente horizontal da velocidade vertical é muito inferior ao vento de corte vertical, a componente horizontal da vorticidade é:

$$\vec{\omega}_h \approx \left(-\frac{\partial v}{\partial z} \right) \hat{i} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \hat{j} = \vec{\omega}_s + \vec{\omega}_c = \hat{k} \times \vec{S} \quad (4)$$

$$\overrightarrow{\omega_s} = \left(-\frac{\partial v}{\partial z}\right) \hat{i} \quad (5)$$

$$\overrightarrow{\omega_c} = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) \hat{j} \quad (6)$$

Onde ω_c é a vorticidade cruzada.

A helicidade relativa à tempestade é:

$$SREH = (\vec{V} - \vec{C}) \cdot \overrightarrow{\omega_h} = |(\vec{V} - \vec{C})| \hat{i} \cdot (\omega_s \hat{i} + \omega_c \hat{j}) = |(\vec{V} - \vec{C})| \omega_s \quad (7)$$

A helicidade foi calculada entre os níveis 0 e 3 km e para o cálculo da diferença entre velocidade do vento e velocidade da tempestade, usa-se a velocidade média entre as camadas 0 e 3 km.

Capítulo 4 | Dados e métodos

4.1 – Dados

4.1.1 – Descrição do modelo WRF

Para a realização deste trabalho recorreu-se ao modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*). Este modelo é um sistema de previsão numérica do tempo em mesoescala destinado tanto para investigação atmosférica como para previsão operacional do estado do tempo (Skamarock et al., 2008).

O modelo WRF consegue produzir simulações não só baseadas em condições atmosféricas reais (observações, reanálises e dados resultantes de modelos) mas também a partir de um conjunto de dados idealizados. Neste trabalho foram utilizadas condições iniciais e de fronteira obtidos a partir de reanálises e de modelos globais.

Com o WRF é possível utilizar duas versões que resolvem a dinâmica: ARW (*Advanced Research WRF*) e NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*). Neste trabalho utilizou-se a versão ARW (*Advanced Research WRF*) do WRF. Esta versão é a componente principal do sistema de modelação e foi desenvolvida pelo NCAR (*National Center for Atmospheric Research*). O WRF-ARW integra as equações de Euler não hidrostáticas e compressíveis. Para a realização das simulações são utilizados níveis *eta* (η). Os níveis η constituem um sistema de coordenadas verticais de pressão hidrostática, que acompanham a topografia do terreno, contrariamente às coordenadas isobáricas em que as isóbaras podem interseccionar irregularidades do solo, como por exemplo em regiões montanhosas, o que obrigaria à extrapolação dos valores abaixo desses níveis. O sistema de coordenadas η define a posição vertical de um ponto na atmosfera como a razão da diferença da pressão entre esse ponto e o topo do domínio. Desta forma, o nível $\eta=1$ encontra-se na superfície enquanto que o nível $\eta=0$ se encontra no limite superior do domínio do modelo (Figura 3). Para o cálculo das coordenadas η é utilizada a seguinte expressão (Skamarock et al., 2008):

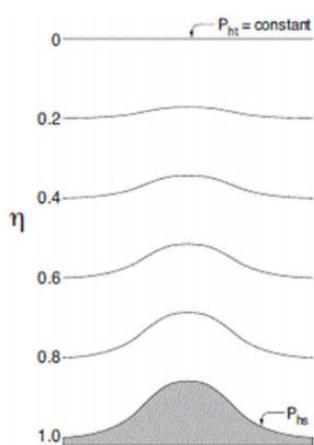


Figura 3 Sistema de coordenadas verticais *eta*. (Fonte: Skamarock et al., 2008)

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}} \quad (8)$$

Onde p_{hs} e p_{ht} correspondem à pressão hidrostática à superfície e no topo do domínio do modelo respetivamente e p_h corresponde à componente hidrostática da pressão no nível η , num determinado ponto.

O modelo utilizado contém 29 níveis verticais η .

As simulações foram realizadas por Marta-Almeida et al. (2016) com três domínios aninhados que comunicam nos dois sentidos. Os domínios têm resolução horizontal de 81, 27 e 9 km e são mostrados na Figura 4.

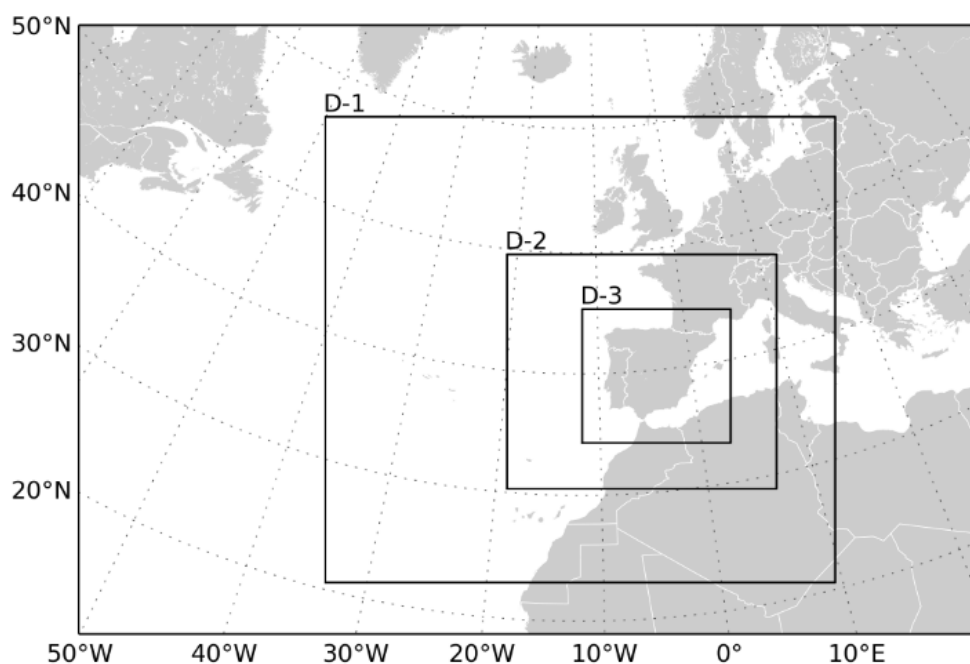


Figura 4 Domínio do modelo utilizado na implementação regional WRF, com resoluções de 81, 27 e 9 km. (Fonte: Marta-Almeida et al. (2016))

Estas simulações utilizam condições iniciais e de fronteira obtidas a partir de simulações previamente realizadas com modelo climático global do Max Planck Institute Earth System - low resolution (MPI-ESM-LR) e das reanálises ERA-Interim (Dee et al., 2011). As reanálises ERA-Interim são obtidas através do Centro Europeu de Previsão a Médio Prazo (ECMWF). São uma forma de obter campos tridimensionais das variáveis atmosféricas a partir de dados reais (observados) e interpolá-los fisicamente com recurso a modelos atmosféricos numéricos globais para todo o globo. Desta forma consegue-se garantir que os dados usados são muito próximos da realidade observada embora com uma “assinatura” do modelo utilizado para gerar as análises ou reanálises e que são fisicamente consistentes entre si. O sistema de assimilação de dados utilizado para gerar as reanálises ERA-Interim é baseado no IFS (Cy31r2), aplica o método de assimilação de dados 4D-Var com uma janela de análise de 12 horas. A resolução espacial dos dados obtidos é de aproximadamente 81 km com 60 níveis de pressão na vertical, começando na superfície, até aos 0.1 hPa (ECMWF, s.d.).

O modelo MPI-ESM-LR é um modelo climático global (GCM) desenvolvido no *Planck Institute for Meteorology* (MPI-M), a partir do modelo ECHAM5/MPIOM. Este modelo é totalmente descrito por Giorgetta et al. (2013) e particularizado no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*. O MPI-ESM-LR é considerado um dos melhores modelos para simular o clima Europeu (Brands et al., 2013; Brands et al., 2011), particularmente para Portugal (Cardoso et al., 2019).

4.1.2 – Descrição das simulações

Neste estudo, são utilizadas duas simulações para o clima histórico recente (1986-2005) forçadas pelo modelo MPI-ESM-LR e pelas ERA-Interim. Para o clima futuro (2080-2099) foi

utilizada uma simulação forçada pelo modelo MPI-ESM-LR. Os período de 20 anos utilizados são os mesmos que são considerados no 5º relatório do IPCC (Stocker et al., 2013).

As reanálises ERA-Interim foram apenas utilizadas para o clima histórico com a finalidade de validar as simulações forçadas pelo MPI-ESM-LR. Esta validação foi realizada por Marta-Almeida et al. (2016) tendo-se concluído que o sistema WRF forçado pelo MPI pode ser utilizado com confiança na realização de simulações climáticas para o futuro. As mesmas simulações foram ainda utilizadas na aplicação de correcção de viés dos dados simulados.

A simulação futura foi realizada para o cenário de emissão de gases com efeito de estufa RCP8.5 (*Representative Concentration Pathways*) (Sillmann et al., 2013). Este é um dos cenários mais estudados e representa um forçamento radiativo de 8.5 Wm^{-2} até 2100 e um contínuo aumento posteriormente (Moss et al., 2007) correspondendo a um aquecimento médio global de 4.5°C em 2100.

Para este trabalho utilizaram-se apenas duas variáveis atmosféricas: intensidade do vento meridional e zonal. A partir destas obteve-se a intensidade e direcção do vento, helicidade (0-3 km) e vento de corte (0-6km). Foram utilizados dados para os dois períodos temporais. Foram extraídos dados para os primeiros 19 níveis (representados na Tabela 1), a partir da superfície. Os valores presentes na tabela são aproximações. Apenas foram considerados os primeiros 19 níveis uma vez que a pressão mínima pretendida para o estudo era próximo dos 300 hPa, onde se localiza normalmente a corrente de jato. A amostragem temporal é de 3 horas correspondendo às 00h, 03h, 06h, 09h 12h, 15h, 18h e 21h de cada dia. Os dados foram extraídos para o domínio D3 (resolução horizontal de 9 km). Os dados foram extraídos para 26 cidades da Península Ibérica. O critério de escolha de cidades baseou-se principalmente nas cidades com aeroporto. Para a caso de Portugal adicionaram-se ainda as capitais de distrito e para o caso de Espanha, além das grandes cidades, seleccionaram-se mais algumas que permitissem uma distribuição espacial mais homogénia. Na atmosfera livre, a representatividade espacial destes locais é superior relativamente à superfície e camada limite. As cidades escolhidas encontram-se presentes na Tabela 2, juntamente com as respetivas coordenadas.

Tabela 1 Altitude (m) e pressão (hPa) aproximadas correspondentes a cada nível eta.

Nível	Altitude (m)	Pressão (hPa)
1	27	1009
2	94	1001
3	187	990
4	305	977
5	454	959
6	644	938
7	876	912

8	1221	874
9	1668	828
10	2137	781
11	2630	734
12	3354	670
13	4293	593
14	5227	524
15	6157	461
16	7080	406
17	7997	356
18	8910	311
19	9823	271

Tabela 2 Lista de cidades a considerar na dissertação, juntamente com a sua latitude e longitude, em graus.

Portugal		
Cidades	Latitude (°)	Longitude (°)
Braga	41.54	-8.43
Viana do Castelo	41.67	-8.75
Vila Real	41.31	-7.74
Bragança	41.80	-6.78
Porto	41.17	-8.58
Aveiro	40.75	-8.67
Viseu	40.67	-7.89
Guarda	40.65	-7.25
Coimbra	40.16	-8.40

Castelo Branco	39.80	-7.47
Leiria	39.73	-8.79
Santarém	39.24	-8.71
Lisboa	38.50	-9.08
Portalegre	39.28	-7.45
Évora	38.57	-7.92
Setúbal	38.56	-8.90
Beja	38.00	-7.85
Faro	37.08	-7.83
Espanha		
Lugo	43.01	-7.52
Bilbau	43.23	-2.93
Saragoça	41.63	-0.92
Barcelona	41.33	2.08
Madrid	40.40	-3.70
Valência	39.50	-0.33
Múrcia	37.98	-1.11
Sevilha	37.39	-6.00

4.2 – Métodos

4.2.1 – *Bias Correction*

Os dados simulados por modelos apresentam, frequentemente, erros quando comparados com dados observados. Esses erros podem ter origem em vários fatores, nomeadamente, resolução espacial, métodos numéricos usados para resolver as equações diferenciais, conhecimento parcial ou desconhecimento de alguns fenómenos físicos, entre outros. Assim, os dados simulados são frequentemente corrigidos antes de serem utilizados. Este pós processamento designa-se Correção de Viés (*Bias Correction*). Neste estudo, os dados simulados foram corrigidos para o clima histórico e futuro. Segundo (Déqué, 2007), existem duas formas imediatas de se fazer a correção dos dados provenientes dos modelos. A primeira consiste em adicionar a diferença climatológica entre simulação do clima futuro e simulação do clima

histórico aos dados observados (método delta). Já a segunda forma de corrigir os dados consiste em remover o viés da série simulada para o clima futuro, aplicando a diferença climatológica entre os dados observados e a série simulada para o clima histórico (método de eliminar o viés). Estas técnicas assumem, no primeiro caso, que a variabilidade no cenário climático se mantém a mesma, e no segundo caso, é assumido que a variabilidade do modelo climático regional é perfeita (Amengual et al., 2012a). A aplicação do método quantil-quantil é mais flexível que os dois métodos referidos previamente, e é um processo que tem sido usado para a correção do viés em variáveis meteorológicas simuladas (Bo et al., 2007; Déqué, 2007; Reichle & Koster, 2004; Wood et al., 2004). Neste seguimento, (Amengual et al., 2012b) apresenta uma nova abordagem ao método de calibração quantil-quantil, baseado numa função não paramétrica que corrige a média, a variabilidade e forma numa função de distribuição cumulativa (CDF) simulada das variáveis climáticas. Para este trabalho, utilizou-se este método.

Para aplicar este método, começou-se por calcular na i -ésima posição o valor p_i (clima futuro corrigido), onde o_i são os dados observados (ERA-Interim), s_{ci} são o histórico simulado original e s_{fi} o futuro simulado original.

$$p_i = o_i + g\bar{\Delta} + f\Delta'_i \quad (9)$$

onde,

$$\Delta_i = s_{fi} - s_{ci} \quad (10)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (s_{fi} - s_{ci})}{N} = \bar{s}_f - \bar{s}_c \quad (11)$$

$$\Delta'_i = \Delta_i - \bar{\Delta} \quad (12)$$

$$g = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N o_i}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N s_{ci}}{N}} = \frac{\bar{o}}{\bar{s}_c} \quad (13)$$

$$f = \frac{\sigma_o}{\sigma_{s_c}} = \frac{IQR|_o}{IQR|_{s_c}} \quad (14)$$

No que diz respeito à variabilidade da amostra, $IQR|_o$ e $IQR|_{s_c}$ são o intervalo interquartil dos dados observados (ERA-Interim) e dos dados simulados para o clima histórico (MPI-hist), respetivamente. Isto é, a diferença entre o percentil 75 e 25. Na equação, Δ_i é a diferença entre clima futuro e histórico simulados no i -ésimo quantil, e que pode ser expresso pela soma da média da diferença e o correspondente desvio.

Na equação (9), os parâmetros f e g podem ser ignorados (isto é $f=g=1$), o que resultaria no caso em que Δ_i é apenas adicionado aos dados observados sem ser necessário qualquer ajuste posterior.

g é o fator que modela a variação da média das diferenças ($\bar{\Delta}$), enquanto que f calibra as alterações na variabilidade e na forma expressa por Δ'_i . O uso de g e f serve para reconciliar o modelo regional climático (dados resultantes das simulações) com o clima observado. O fator g representa uma correção da média enquanto o fator f corrige a variância. O parâmetro g não é aplicado no caso da temperatura.

Uma forma de mostrar o efeito da correção dos dados através deste método é por comparação entre as CDFs de duas séries. Este gráfico segue a representação que se encontra na figura 2 de Amengual et al. (2012b) mas adaptado aos dados utilizados neste trabalho, nomeadamente ao vento zonal (Figura 5).

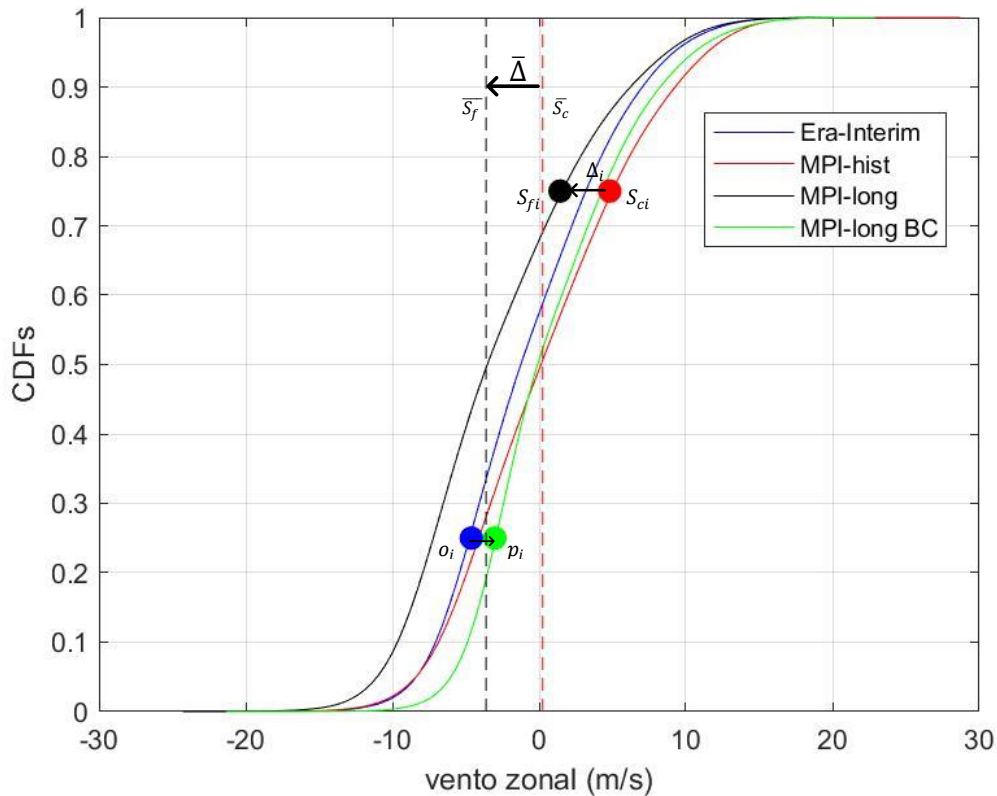


Figura 5 Gráfico do ajuste Q-Q. As CDFs do vento médio são apresentadas para as reanálises ERA-Interim (1986-2005), Clima histórico simulado não corrigido (1986-2005), clima futuro simulado não corrigido (2080-2099) e clima futuro simulado corrigido (2080-2099).

A fim de se verificar se a correção dos dados foi bem aplicada e observar qual o seu impacto, foram feitas três diferentes abordagens: comparação das médias mensais, CDFs e gráficos Q-Q. Para esta verificação escolheu-se uma cidade e um nível *eta* aleatórios, sendo os selecionados Lisboa e o nível 4, correspondente a uma altitude de aproximadamente 455 m. Os testes foram aplicados ao vento zonal e à helicidade (0-3 km).

A Figura 6 mostra valores médios mensais climatológicos do vento zonal e helicidade para ERA-Interim, MPI-hist não corrigido e MPI-hist corrigido.

É possível observar que os dados corrigidos apresentam menor erro do que os dados não corrigidos, relativamente às ERA-Interim. A existência de viés dos dados corrigidos deve-se ao facto dos mesmos terem sido corrigidos para todo o ano e não para cada mês separadamente.

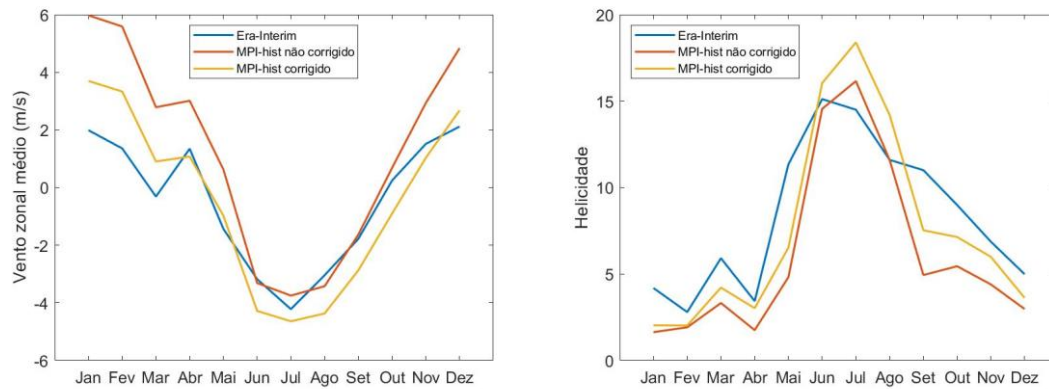


Figura 6 Climatologia anual para o vento zonal médio (m/s) (à esquerda) e para a helicidade (à direita), para reanálises ERA-Interim, clima histórico simulado não corrigido e clima histórico simulado corrigido.

De uma forma geral, o ciclo sazonal é bem representado em todas as séries.

A Figura 7 mostra as CDF do vento zonal e helicidade para os mesmos dados.

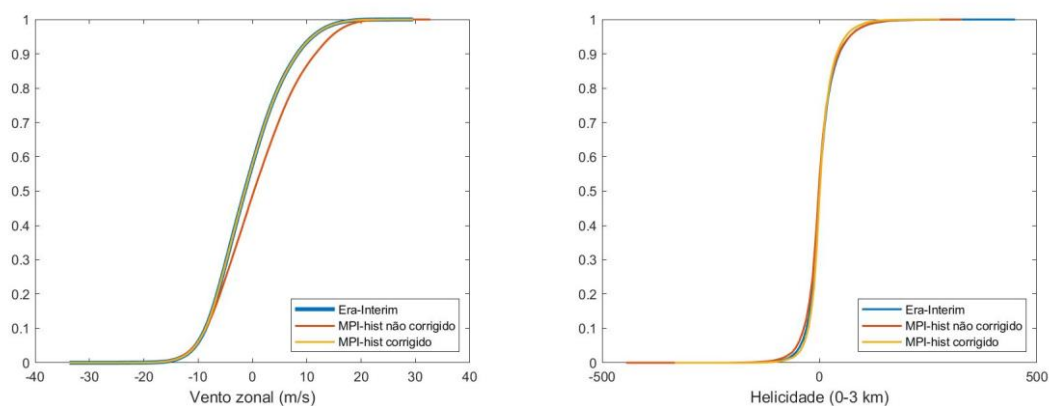


Figura 7 CDFs do vento zonal médio (m/s) (à esquerda) e da helicidade (à direita), para reanálises ERA-Interim, clima histórico simulado não corrigido e clima histórico simulado corrigido.

Pode verificar-se que para o caso do vento zonal, a série ERA-Interim encontra-se sobreposta à série MPI-hist corrigida. Este era o resultado esperado, uma vez que após a correção, a série simulada deve apresentar a mesma distribuição que a série de observações. É possível ainda verificar a diferença entre as séries MPI-hist antes e após correção.

Já para o caso da helicidade, não é de esperar que a série MPI-hist corrigida se sobreponha à série ERA-Interim, já que esta é uma variável derivada dos dados previamente corrigidos (vento zonal e meridional). Verifica-se que para a helicidade as linhas se mantêm quase sempre muito próximas. As maiores diferenças entre as duas séries encontram-se para o intervalo de valores $[-100,100]$, sendo que próximo de 0 é quase nula.

Por último, a Figura 8 mostra os gráficos Q-Q para os mesmos dados.

No gráfico da esquerda apresenta-se o vento zonal, onde podemos comprovar que após a correção (linha a vermelho), a série sobrepõe-se completamente à diagonal representada, o que indica que a correção foi bem aplicada. No gráfico da helicidade (à direita), o mesmo não se

verifica, uma vez que estamos a analisar uma variável calculada a partir do vento zonal e meridional previamente corrigidos. Caso a correção fosse aplicada diretamente à helicidade, calculada com os dados originais de vento meridional e zonal, o resultado obtido nesta seria igual ao do primeiro gráfico. Contudo, optou-se por corrigir primeiro os dados iniciais e utilizá-los posteriormente no cálculo de todas as variáveis utilizadas neste trabalho.

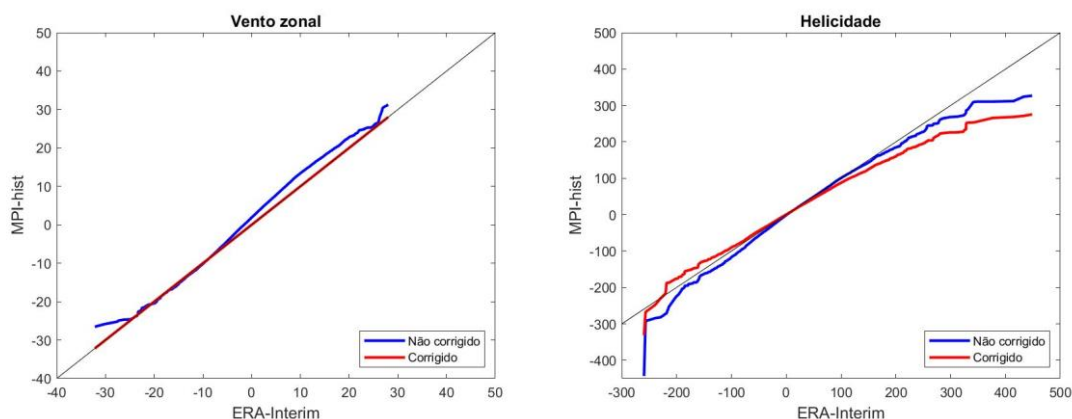


Figura 8 Gráficos Q-Q para a relação entre dados das reanálises ERA-Interim e dados da simulação para o clima histórico não corrigido. À esquerda encontra-se o gráfico para o vento zonal (m/s) e à direita encontra-se o gráfico para a helicidade.

Relativamente à série não corrigida do vento zonal, observamos que para valores extremos (menor que -25 m/s e maior que 25 m/s) a série se distancia da diagonal, bem como para os valores compreendidos entre 0 e 20 m/s aproximadamente. Já para o caso da helicidade, verificamos um distanciamento da diagonal a aumentar à medida que os valores das séries aumentam (em módulo), apresentando ainda uma maior distância nos valores extremos. Pode-se observar ainda que para valores de helicidade positivos, a série não corrigida é superior à série corrigida, ao contrário do que acontece para os valores negativos, concluindo assim que a série não corrigida é superior à corrigida, em módulo.

Após estas verificações e considerando que a correção foi feita de igual forma para todo o conjunto de dados, conclui-se que a correção por *Bias Correction* foi bem aplicada.

4.2.2 – Teste t-Student

A significância estatística de diferenças entre médias foram avaliadas por aplicação do teste *t-Student*. Para a realização do teste *t-Student* recorreu-se à função `ttest2` do Matlab. Esta função devolve o resultado do teste para a hipótese nula que resulta dos dados das duas séries de entrada (série para clima histórico e para clima futuro) independentes com distribuição normal, iguais médias e variâncias desconhecidas. A hipótese alternativa é de que os dados das séries sejam provenientes de populações com médias diferentes. O resultado do teste de hipóteses é 1 se a hipótese nula for rejeitada, e 0 se for aceite, para um nível de significância de 5%.

A forma como o Matlab faz este teste é descrita pelo software. O teste é um teste paramétrico que compara a localização de duas amostras de dados independentes. O teste estatístico é:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} \quad (15)$$

onde \bar{x} e \bar{y} são as médias das séries, s_x e s_y são os desvios padrão das séries e n e m são os tamanhos das séries. No caso em que se assume que as duas amostras provêm de populações com igual variância, o teste estatístico para a hipótese nula tem uma distribuição de *t-Student* com $n+m-2$ graus de liberdade, e o desvio padrão da amostra é substituído pelo desvio padrão agrupado.

$$s = \sqrt{\frac{(n-1)s_x^2 + (m-1)s_y^2}{n+m-2}} \quad (16)$$

No caso em que não é assumido que as duas amostras provêm de populações com variâncias iguais, o teste estatístico para a hipótese nula tem uma distribuição de *t-Student* aproximada com um número de graus de liberdade dados pela aproximação de Satterthwaite. Este teste é por vezes designado teste de Welch.

4.2.3 – Comparação entre as médias dos climas histórico e futuro

Mais à frente, criaram-se 5 tabelas (uma para cada variável). Estas tabelas encontram-se divididas por cidades e por meses. Para cada cidade foram obtidos valores médios da série para o clima histórico (primeira linha), para o mês correspondente à coluna em que o valor se encontra. A segunda linha representa a diferença entre o clima futuro e o clima histórico (MPI-hist – MPI-long). Para cada valor de diferença entre climas foi realizado um teste de significância estatística a 5%. O teste de significância utilizado foi o teste de *t-Student* referido anteriormente.

As células preenchidas a cor representam as cidades/meses onde se verifica um resultado positivo para o teste de significância. Optou-se ainda por variar a cor do preenchimento conforme o sinal do valor obtido: vermelho para diferenças positivas e azul para diferenças negativas.

4.2.4 – Alteração climática na intensidade e direção do vento

Boxplots

Os *boxplots* foram calculados utilizando a função *boxplot* do Matlab. Os dados foram divididos por meses, para cada série (clima histórico e clima futuro). Esta função criou uma caixa para cada mês, que engloba os valores entre os percentis 25 (limite inferior da caixa) e 75 (limite superior da caixa). A caixa encontra-se dividida a meio, indicando onde se encontra o percentil 50 (mediana). Fora da caixa são mostradas linhas a tracejado seguidas de dois traços horizontais, mostrando os mínimos e máximos absolutos dos dados. Nos casos em que existem *outliers*, estes ficam simbolizados com o sinal “+” a vermelho.

Frequência da direção e intensidade do vento à superfície

Mais à frente, dividiram-se os dados por direções. As direções consideradas foram: Norte ([337,5° ; 22,5°]), Noroeste ([22,5° ; 67,5°]), Este ([67,5° ; 112,5°]), Sudeste ([112,5° ; 157,5°]),

Sul ([157,5° ; 202,5°]), Sudoeste ([202,5° ; 247,5°]), Oeste ([247,5° ; 292,5°]), Noroeste ([292,5° ; 337,5°]).

Para cada mês, identificou-se a frequência de ocorrência para cada direção. Identificou-se ainda a intensidade do vento médio para cada mês e direção.

Nos gráficos, meses apresentam-se no eixo das ordenadas e as direções no eixo das abcissas. Representaram-se linhas para a mesma intensidade do vento (preenchidas a preto) onde podem observar-se, para cada mês e cada direção, qual a intensidade média do vento (à superfície). Representou-se ainda uma escala de cores entre o amarelo e o vermelho os valores da frequência, em percentagem, onde se verifica quais as frequências obtidas para cada mês e direção.

Optou-se por realizar estes gráficos para o clima histórico e para a diferença (em percentagem) entre histórico e futuro. A diferença foi calculada da seguinte forma:

$$Diferença(\%) = 100 \times \left[\frac{futuro - histórico}{histórico} \right] \quad (17)$$

Rosa dos ventos

A rosa dos ventos é a forma mais eficaz de se comparar a intensidade e direção do vento entre os climas histórico e futuro, neste caso, para o vento à superfície.

Representou-se uma rosa dos ventos baseada no número de ocorrências de cada intensidade e direção do vento. No gráfico, podemos comprovar que existem 40 barras, divididas pelas várias direções. Cada barra é maior, quanto maior for o número de ocorrências para essa dada direção. É possível identificar a frequência de ocorrência através dos círculos presentes no fundo da rosa dos ventos. Também é possível verificar que para cada barra, existe uma gama de cores, que correspondem à intensidade do vento. Quanto maior for a área abrangida por uma determinada cor, maior é a ocorrência de ventos com a respetiva intensidade.

Hodógrafo

Os hodógrafos são uma forma de representar a variação vertical da direção e intensidade do vento. Neste caso foram representadas as altitudes de 0 a 6km, de 1 em 1 km. Para a representação dos hodógrafos, optou-se por representar um para cada cidade com os dois climas no mesmo gráfico. Os cálculos realizados para determinar a intensidade e a direção foram os seguintes:

$$Intensidade = \sqrt{u_{médio}^2 + v_{médio}^2} (m/s) \quad (18)$$

$$Direção = \tan^{-1} \left(\frac{v_{médio}}{u_{médio}} \right) (°) \quad (19)$$

4.2.5 – Comparação anual dos eventos extremos de cada clima

No último capítulo do trabalho, pretende-se comparar os eventos extremos no clima histórico e futuro. Consideraram-se eventos extremos, períodos com duração igual ou superior a 6h (dois

passos temporais dos dados, uma vez que a resolução temporal é de 3h) em que o valor da variável seja superior ao percentil 90 (i.e. *threshold*) da série para o clima histórico. O *threshold* é calculado para o clima histórico apenas, e utilizado na identificação de eventos extremos nos dois climas. Cada variável tem o seu *threshold*, relativo à série respectiva do clima histórico.

Os critérios de comparação entre o clima histórico e o clima futuro serão: duração total dos eventos extremos por ano, duração média dos eventos extremos, número médio anual de eventos extremos, média do valor médio dos eventos extremos, média do valor máximo dos eventos extremos, máximo do valor médio dos eventos extremos e máximo absoluto dos eventos extremos.

4.2.6 – Comparação dos eventos extremos de cada clima por estação do ano e por região

Para completar o estudo dos eventos extremos, optou-se por considerar neste trabalho a abordagem feita por (Pereira et al., 2018) na figura 6 do seu artigo. Começou-se por dividir o conjunto de dados por estações do ano, onde se agruparam os meses de dezembro, janeiro e fevereiro para a primeira estação. Para a segunda agruparam-se os três meses seguintes, aplicando o mesmo método até perfazer as quatro estações do ano. Optou-se por realizar os cálculos também para o conjunto de dados anual. De seguida, foram criados nove tipos de eventos com base na duração em horas de cada evento e na intensidade do evento (subtração ao *threshold* do valor médio do evento). Na Figura 9 (à direita) encontra-se uma matriz que mostra os tipos de eventos considerados. O critério utilizado para dividir os eventos por tipos foi através dos percentis 25 e 75 tanto para a duração como para a intensidade dos eventos. Isto significa que cada variável terá uma divisão diferente de tipos, adaptada aos valores apresentados pela mesma. Os percentis foram calculados para cada cidade, sendo que os dados estão divididos por cidades e cada uma apresenta valores diferentes de intensidade dos eventos. Esta divisão por eventos foi realizada para o conjunto anual de dados onde se obteve o número de eventos extremos em cada cidade e para cada tipo de evento. Posteriormente identificaram-se as estações do ano a que correspondia cada evento e efetuou-se a divisão por estação. Para obter os dados por região somou-se o número de eventos de cada cidade (já divididos por tipo e por estação do ano) pertencente a cada região.

A divisão da área de estudo por regiões encontra-se na Figura 9 (à esquerda). Optou-se por definir como região 1 a área total de estudo e criar outras 4 regiões correspondentes a uma divisão por quadrantes da área em estudo. A região 2 representa o quadrante a noroeste, a região 3 fica a sudoeste, a região 4 a nordeste e a região 5 a sudeste. A divisão por quadrantes mostrou-se ser a mais adequada ao tipo de dados e distribuição espacial de pontos utilizada neste trabalho.

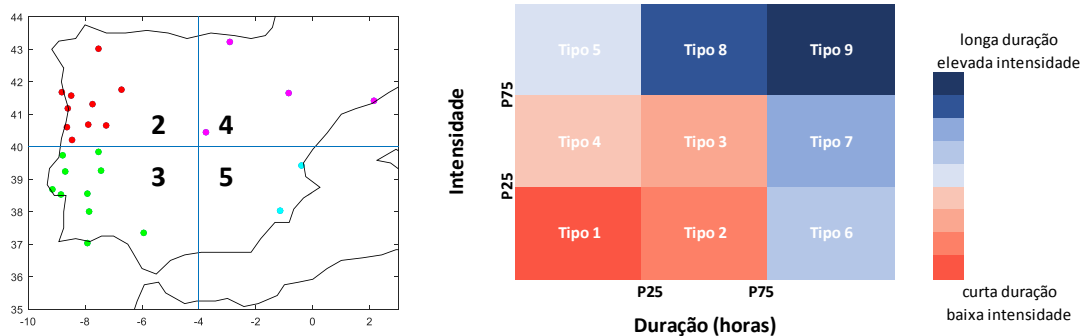


Figura 9 Divisão da área de estudo por regiões (esquerda). Matriz representativa dos tipos de eventos extremos possíveis, considerando a sua intensidade e duração (direita).

Este processo aplicou-se separadamente para os climas histórico e futuro. Foi estimada a significância estatística (5% *t-Student*) das diferenças entre os dois climas.

No gráfico resultante, obtém-se uma matriz de 3 linhas e 3 colunas para cada estação do ano e região. Esta matriz equivale aos 9 tipos de eventos criados. Dentro de cada célula da matriz temos 2 valores, onde o de cima representa a soma total de eventos para aquela estação do ano, região e tipo. O valor abaixo representa a diferença em percentagem entre os climas $100 \times \left(\frac{MPI-long - MPI-hist}{MPI-hist} \right)$. Células com valores representam diferenças estatisticamente significativas. As células a vermelho (azul) representam diferenças positivas (negativas) entre futuro e histórico.

4.2.7 – Período de retorno

São estimados os períodos de retorno dos eventos extremos para cada cidade. Define-se a probabilidade de excedência associada a uma observação específica:

$$qi = \frac{N - k}{n + 1 - 2k} \quad (20)$$

onde N é uma série ordenada de forma decrescente desde o número de anos (neste caso, 20) até 1 e k é uma constante ($=0.44$ calculada a partir do método de Gringorten). De seguida, calculou-se a probabilidade de não excedência pi :

$$pi = 1 - qi \quad (21)$$

A definição estatística de período de retorno assume que X é uma variável aleatória cuja função de distribuição cumulativa é $F_x(X)$. A probabilidade de X ser inferior a X_p é dada por:

$$F_x(X) = P(X \leq X_p) = p \quad (22)$$

A probabilidade de este evento ser excedido é igual a $1-p$ e a percentagem de excedência é denotada por $100(1-p)$. Para um evento X_p , o período de retorno correspondente à sua probabilidade de excedência é T .

$$T = \frac{1}{1-p} \quad (23)$$

Usando a definição, um período de retorno de 100 anos pode ser considerado como sendo um evento com uma probabilidade de excedência de $1-p=0.01$ ou com uma probabilidade de não excedência $p=0.99$.

Usando o conceito de T , calculou-se $T_{estimado}$:

$$T_{estimado} = \frac{1}{1-p_i} \quad (24)$$

O $T_{estimado}$ representa a distribuição estimada para os 20 anos de dados.

De seguida, assumiu-se que os dados seguem uma distribuição específica e foram estimados os parâmetros dessa mesma distribuição. Testou-se então a distribuição de *Gumbel*.

Os estimadores para os parâmetros da distribuição de *Gumbel* são calculados usando a média da amostra e o desvio padrão. As equações de estimativa são:

$$\hat{\beta} = \frac{s\sqrt{6}}{\pi} \quad (25)$$

$$\hat{\zeta} = \bar{x} - \gamma\hat{\beta} \quad (26)$$

onde s é o desvio padrão da amostra, \bar{x} é a média da amostra e $\gamma = 0.57721$ é a constante de Euler. A função da distribuição cumulativa dada por *Gumbel* é:

$$F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{(x-\zeta)}{\beta}\right]\right\} = p_{teórico\ gumbel} \quad (27)$$

de onde se obtém a estimativa teórica de p . x é uma série com valores escolhidos que se adaptassem aos resultados obtidos. Esta série foi diferente para o cálculo do período de retorno em número de eventos/ano e em duração dos eventos.

$x_{nr\ eventos/ano} = [5\ 10\ 15\ 20\ 25\ 30\ 35\ 40\ 45\ 50\ 55\ 60\ 65\ 70\ 75\ 80\ 85\ 90\ 95\ 100]$

$x_{duração} = [5\ 10\ 20\ 30\ 40\ 50\ 60\ 70\ 80\ 90\ 100\ 110\ 120\ 130\ 140\ 150\ 160\ 170\ 180\ 190\ 200]$

De seguida calculou-se um $T_{teórico\ gumbel} = \frac{1}{1-P_{teórico\ gumbel}}$.

Por último, testou-se a distribuição de *Weibull* por forma a verificar qual destas duas distribuições se adaptava melhor aos dados. Foram testadas 3 formas de ajustar a distribuição, em que a que se mostrou mais adequada foi a aproximação através do método dos momentos da distribuição de *Weibull*. Calcularam-se então os parâmetros α e β desta distribuição (utilizando o suplemento RealStats do Excel). No final, calculou-se então um $P_{teórico\ weibull}$ e um $T_{teórico\ weibull}$:

$$P_{teórico\ weibull}(x, \alpha, \beta) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (28)$$

$$T_{teórico\ weibull} = \frac{1}{1 - P_{teórico\ weibull}} \quad (29)$$

onde x é $x_{duração}$ ou $x_{nr\ eventos/ano}$.

Os gráficos representados para os períodos de retorno do número de eventos por ano, utilizam no eixo do y a série $x_{nr\ eventos/ano}$ e no eixo do x a série $T_{teórico\ weibull}$. Já os gráficos para o período de retorno para a duração dos eventos, utilizam no eixo do y a série $x_{duração}$ e no eixo do x a série $T_{teórico\ gumbel}$.

Neste estudo, os períodos de retorno são estimados para cada clima considerando que o mesmo não varia. Por exemplo, a estimativa de um período de retorno de 100 anos para o clima histórico considera que o mesmo não irá variar pelo menos durante 100 anos.

Capítulo 5 | Alteração climática

5.1 – Vento à superfície

Numa primeira abordagem optou-se por analisar as alterações que se esperam para o futuro dos valores médios da intensidade do vento à superfície. Tal como referido na secção 4.2.3, nesta secção do trabalho apresenta-se uma tabela que visa comparar as diferenças entre os valores médios do clima histórico e futuro, registados em cada cidade e mês. A Tabela 3 mostra a intensidade do vento médio mensal e anual à superfície para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico.

A primeira linha de cada cidade representa os valores médios do clima histórico, enquanto que a segunda linha representa a diferença entre climas. As células preenchidas a cor representam valores estatisticamente significativos, onde a cor vermelha representa diferenças positivas e a cor azul, diferenças negativas.

Verifica-se que todos os meses e ano apresentam diferenças maioritariamente negativas, exceto para algumas cidades. Tendo em conta apenas as células com valores estatisticamente significativos, verifica-se que os meses de junho, julho e setembro apresentam diferenças positivas, ao contrário dos restantes meses.

Numa abordagem relativa às cidades, observa-se uma grande distinção entre algumas regiões. Desde o norte de Portugal até Santarém (inclusive), as diferenças são maioritariamente negativas. A sul de Santarém os valores são positivos, à exceção de Faro. Já em Espanha, os valores são maioritariamente negativos, à exceção do Lugo onde são na maioria positivos.

Globalmente, verifica-se 65 células com diferenças significativas, das quais 21 (32%) são positivas e 44 (68%) são negativas. Para o caso anual, apenas 5 cidades de 26 não apresentavam valores estatisticamente significativos e apenas 3 apresentaram aumento da intensidade do vento no futuro.

De uma forma geral a intensidade do vento média diminui para todos os meses, exceto junho, julho e setembro, em que aumenta. Em termos regionais, conclui-se que em toda a Espanha a intensidade do vento média também diminuirá à exceção do Lugo, e em Portugal encontra-se uma divisão entre cidades a norte e a sul de Santarém, em que as cidades a norte de Santarém (inclusive) e Faro apresentam valores menores de intensidade do vento à superfície para o futuro, enquanto que as cidades a sul evidenciam um aumento desta variável, em média.

Tabela 3 Intensidade do vento médio mensal e anual à superfície para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

		Meses												
CIDADES		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Braga	MPI-hist	7,05	6,63	5,66	5,20	4,28	3,69	3,74	3,77	4,07	4,78	5,76	6,53	5,09
	Difer.	-0,49	-0,02	-0,25	-0,40	-0,20	-0,01	0,10	-0,08	-0,34	-0,55	0,03	-0,42	-0,22
Viana do castelo	MPI-hist	8,57	8,33	7,40	6,86	6,29	5,91	6,46	6,37	6,21	6,41	7,23	8,12	7,01
	Difer.	-0,62	-0,08	-0,48	-0,17	-0,10	0,46	0,26	0,26	-0,05	-0,62	0,01	-0,44	-0,13
Vila Real	MPI-hist	6,89	6,80	6,00	5,73	5,02	4,29	4,64	4,68	4,88	5,04	5,88	6,53	5,53
	Difer.	-0,44	-0,22	-0,45	-0,39	-0,26	0,23	0,03	-0,10	-0,17	-0,13	-0,10	-0,63	-0,22
Bragança	MPI-hist	5,96	6,01	5,67	5,55	5,43	4,80	5,01	5,15	5,10	5,07	5,51	5,65	5,41
	Difer.	-0,35	-0,34	-0,49	-0,14	-0,23	0,14	0,02	-0,36	-0,16	-0,03	-0,30	-0,72	-0,25
Porto	MPI-hist	7,96	7,44	6,05	5,49	4,57	3,89	4,12	4,04	4,27	4,82	6,03	7,34	5,50
	Difer.	-0,81	-0,21	-0,41	-0,49	-0,29	0,07	-0,07	-0,18	-0,35	-0,69	-0,10	-0,70	-0,36
Aveiro	MPI-hist	9,34	8,91	7,59	7,09	6,08	5,25	5,53	5,53	5,66	6,24	7,44	8,79	6,94
	Difer.	-0,68	-0,07	-0,47	-0,52	-0,29	0,14	-0,17	-0,45	-0,33	-0,75	-0,07	-0,60	-0,36
Viseu	MPI-hist	4,33	4,29	4,15	4,10	3,89	3,68	3,81	3,78	3,71	3,64	3,92	3,99	3,94
	Difer.	-0,25	-0,15	-0,33	-0,16	-0,03	0,17	-0,01	-0,17	-0,14	-0,15	-0,19	-0,26	-0,14
Guarda	MPI-hist	6,26	6,02	5,68	5,03	4,20	3,78	3,73	3,79	4,34	5,34	6,10	6,00	5,02
	Difer.	0,27	0,02	-0,46	-0,33	-0,09	-0,01	0,16	-0,20	-0,35	-0,74	-0,10	0,36	-0,12
Coimbra	MPI-hist	6,58	6,15	5,48	5,05	4,34	3,87	3,98	4,01	4,28	5,02	6,05	6,50	5,10
	Difer.	-0,10	-0,01	-0,38	-0,29	0,06	0,04	-0,11	-0,20	-0,30	-0,55	-0,11	-0,27	-0,19
Castelo Branco	MPI-hist	6,33	6,07	5,57	5,32	4,74	4,72	5,03	5,11	5,07	5,23	5,78	6,21	5,43
	Difer.	-0,32	-0,32	-0,50	-0,32	0,08	0,29	0,29	-0,10	-0,02	0,07	-0,16	-0,70	-0,14
Leiria	MPI-hist	7,28	6,76	6,08	5,90	5,30	4,62	5,02	4,97	5,00	5,42	6,51	7,17	5,83
	Difer.	-0,60	-0,09	-0,41	-0,30	-0,09	0,23	-0,23	-0,16	-0,12	-0,28	-0,15	-0,77	-0,25
Santarém	MPI-hist	6,22	5,88	5,45	5,27	4,61	4,46	4,76	5,01	4,96	5,18	5,72	5,99	5,29
	Difer.	-0,23	-0,21	-0,39	-0,34	0,12	0,20	0,01	-0,26	-0,01	-0,03	-0,06	-0,58	-0,15
Lisboa	MPI-hist	6,43	6,35	6,05	6,15	5,92	6,20	6,87	6,87	6,14	5,77	5,99	6,17	6,24
	Difer.	-0,11	-0,33	-0,25	-0,14	0,28	0,76	0,39	0,20	0,46	0,28	-0,06	-0,49	0,08
Portalegre	MPI-hist	6,86	6,74	6,25	6,18	5,73	6,03	6,45	6,47	5,97	5,73	6,17	6,48	6,25
	Difer.	-0,29	-0,38	-0,30	-0,17	0,29	0,50	0,54	0,05	0,32	0,31	-0,11	-0,56	0,02
Évora	MPI-hist	7,15	7,08	6,55	6,81	6,43	6,93	7,49	7,40	6,57	6,19	6,48	6,80	6,82
	Difer.	-0,17	-0,19	0,01	-0,17	0,39	0,71	0,50	0,18	0,64	0,29	0,07	-0,43	0,15
Setúbal	MPI-hist	6,76	6,73	6,38	6,56	6,32	6,79	7,40	7,34	6,49	6,04	6,21	6,44	6,62
	Difer.	-0,13	-0,26	-0,09	-0,11	0,37	0,81	0,49	0,25	0,59	0,29	0,02	-0,39	0,15
Beja	MPI-hist	7,23	7,11	6,50	6,95	6,40	6,76	7,00	6,97	6,16	5,99	6,37	6,95	6,70
	Difer.	-0,38	-0,28	0,00	-0,40	0,23	0,55	0,53	0,13	0,70	0,07	0,05	-0,72	0,04
Faro	MPI-hist	6,45	6,28	5,60	5,69	4,67	4,18	3,80	4,03	4,51	5,48	6,22	6,29	5,26
	Difer.	-0,11	-0,42	0,09	-0,60	-0,22	-0,24	-0,43	-0,78	-0,32	-0,88	-0,89	-0,71	-0,46
Lugo	MPI-hist	6,60	6,46	6,07	5,64	5,18	5,25	4,96	5,04	5,36	5,65	6,30	6,47	5,74
	Difer.	0,13	0,27	0,07	0,00	0,09	-0,01	0,77	0,61	-0,02	-0,21	-0,10	0,18	0,15
Bilbau	MPI-hist	6,74	6,48	5,58	4,95	4,24	3,58	3,35	3,51	3,87	4,86	5,86	6,50	4,95
	Difer.	-0,25	-0,31	-0,33	-0,49	-0,34	-0,26	-0,19	-0,40	-0,19	-0,57	-0,33	-0,07	-0,31
Saragoça	MPI-hist	7,12	6,95	6,14	6,41	5,27	4,80	4,57	4,66	4,90	5,56	6,36	7,15	5,82
	Difer.	-0,53	-0,30	-0,20	-0,67	-0,08	-0,28	-0,13	-0,31	-0,16	-0,33	-0,64	-1,13	-0,40
Barcelona	MPI-hist	5,40	5,18	4,93	4,92	4,39	4,14	3,96	4,17	4,48	4,92	5,29	5,38	4,76
	Difer.	-0,17	-0,28	-0,12	-0,28	0,03	-0,21	-0,05	-0,15	-0,16	-0,15	-0,37	-0,59	-0,21
Madrid	MPI-hist	5,97	5,75	5,38	5,09	4,67	4,44	4,52	4,52	4,72	4,69	5,38	5,61	5,06
	Difer.	-0,12	-0,12	-0,17	-0,10	0,09	-0,06	0,14	-0,30	-0,28	0,19	-0,27	-0,40	-0,12
Valência	MPI-hist	5,67	5,38	5,27	5,14	4,47	4,39	4,11	4,32	4,66	5,26	5,91	5,90	5,04
	Difer.	0,00	-0,21	-0,11	-0,31	0,12	-0,08	0,09	-0,27	-0,04	-0,09	-0,39	-0,34	-0,14
Múrcia	MPI-hist	4,38	4,34	4,06	4,42	3,84	3,33	3,15	3,22	3,24	3,52	3,89	4,06	3,78
	Difer.	-0,17	-0,19	-0,08	-0,45	-0,18	-0,12	0,04	-0,14	-0,08	-0,26	-0,25	-0,39	-0,19
Sevilha	MPI-hist	5,81	5,60	5,02	5,16	3,98	3,59	3,08	3,27	3,63	4,80	5,58	5,83	4,61
	Difer.	-0,06	-0,25	0,21	-0,66	-0,19	-0,24	-0,18	-0,54	-0,20	-0,81	-0,64	-0,72	-0,36

5.1.1 – Boxplots

A Figura 10 mostra gráficos boxplot para Lisboa e Madrid para a intensidade do vento mensal para os climas histórico e futuro. De uma forma geral verifica-se que no futuro, os 3 percentis (25, 50 e 75) apresentarão valores inferiores ao histórico. As cidades que apresentam estas características são: Barcelona, Bilbao, Braga e Saragoça. Algumas cidades apresentam este resultado na maioria dos meses, exceto entre 1 a 3 meses, considerados pouco relevantes, como é o caso de Aveiro, Bragança, Coimbra, Leiria, Lugo, Múrcia, Porto, Santarém, Sevilha, Viana do Castelo, Valência, Vila Real e Viseu.

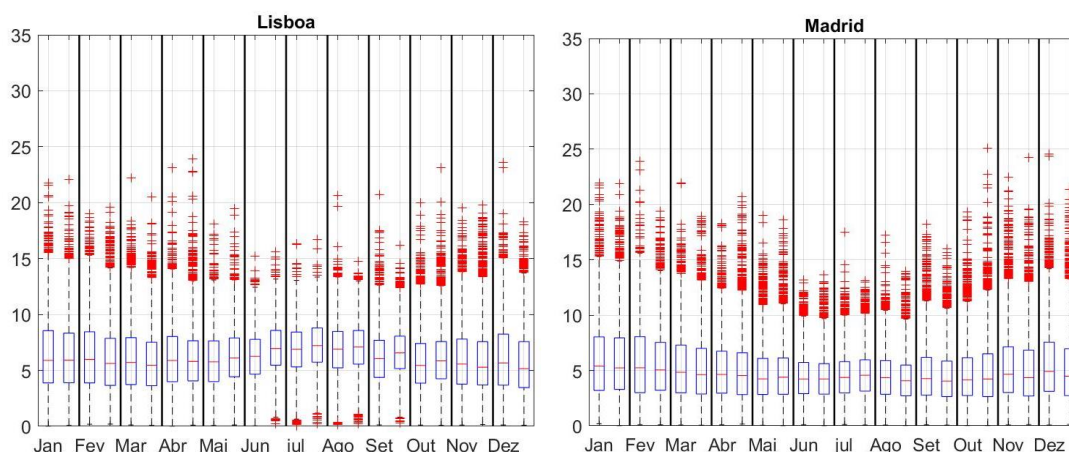


Figura 10 Gráficos Boxplot para Lisboa (esquerda) e Madrid (direita) da intensidade do vento à superfície, para cada mês dos climas histórico (boxplot da esquerda para cada mês) e futuro (boxplot da direita para cada mês). É mostrada a mediana ‘-’, intervalo inter-quartil (rectângulo azul) e outliers ‘+’.

Encontraram-se cidades que apresentavam um padrão sazonal, em que em metade do ano, os valores para os três percentis diminuía, enquanto que na outra metade aumentavam. Na maior parte deles, o que se verifica é um futuro aumento para os meses de primavera e verão (sensivelmente entre maio e outubro) e uma diminuição para os meses de outono e inverno (aproximadamente entre novembro e abril). As cidades que apresentam estas características são: Beja, Castelo branco, Évora, Lisboa, Madrid, Portalegre e Setúbal. Verificou-se ainda que a Guarda apresentava um padrão invertido ao referido anteriormente. As cidades que não se encontram aqui representadas podem ser consultadas em anexo na Figura A1.

5.1.2 – Frequência da direção e intensidade do vento

Na Figura 11 encontram-se representadas a intensidade e a frequência do vento para cada mês e direção, para Lisboa e Madrid para o clima histórico (esquerda) e diferenças futuro-histórico (direita). Os gráficos para as restantes cidades encontram-se em anexo na Figura A2.

Em Lisboa encontram-se ventos predominantemente de SW no verão e de E e NE no inverno. A intensidade do vento é superior para ventos de E no inverno. Espera-se no futuro um aumento no número de vezes em que o vento sopra de W e SW em praticamente todos os meses. No mês de julho espera-se um aumento para ventos de NE. A intensidade do vento apresenta alteração pouco significativa, com diminuição da intensidade do vento para quase todas as direções, exceto W e SW onde se observa um ligeiro aumento.

Em Madrid a direção predominante de verão é W e de inverno são E e NE. Os ventos mais intensos ocorrem no inverno quando vindos de E. No futuro os ventos de NW, W e SW ocorrerão mais vezes. Os ventos de E, principalmente no mês de julho ocorrerão menos vezes. A intensidade do vento diminuirá exceto para os ventos de E em outubro.

Em Aveiro é esperada uma diminuição da intensidade do vento. A frequência dos ventos de W e SW deverá aumentar principalmente no final do verão e outono, ao contrario dos ventos de NE cuja frequência deverá diminuir para os mesmo meses.

Em Barcelona a intensidade do vento é maior nos meses de inverno principalmente para ventos vindos de NE e SW. Espera-se que no futuro aumentem os ventos vindos de N e NW durante o

mês de dezembro e que diminuam os ventos vindos de SW durante junho. A intensidade do vento diminuirá ligeiramente.

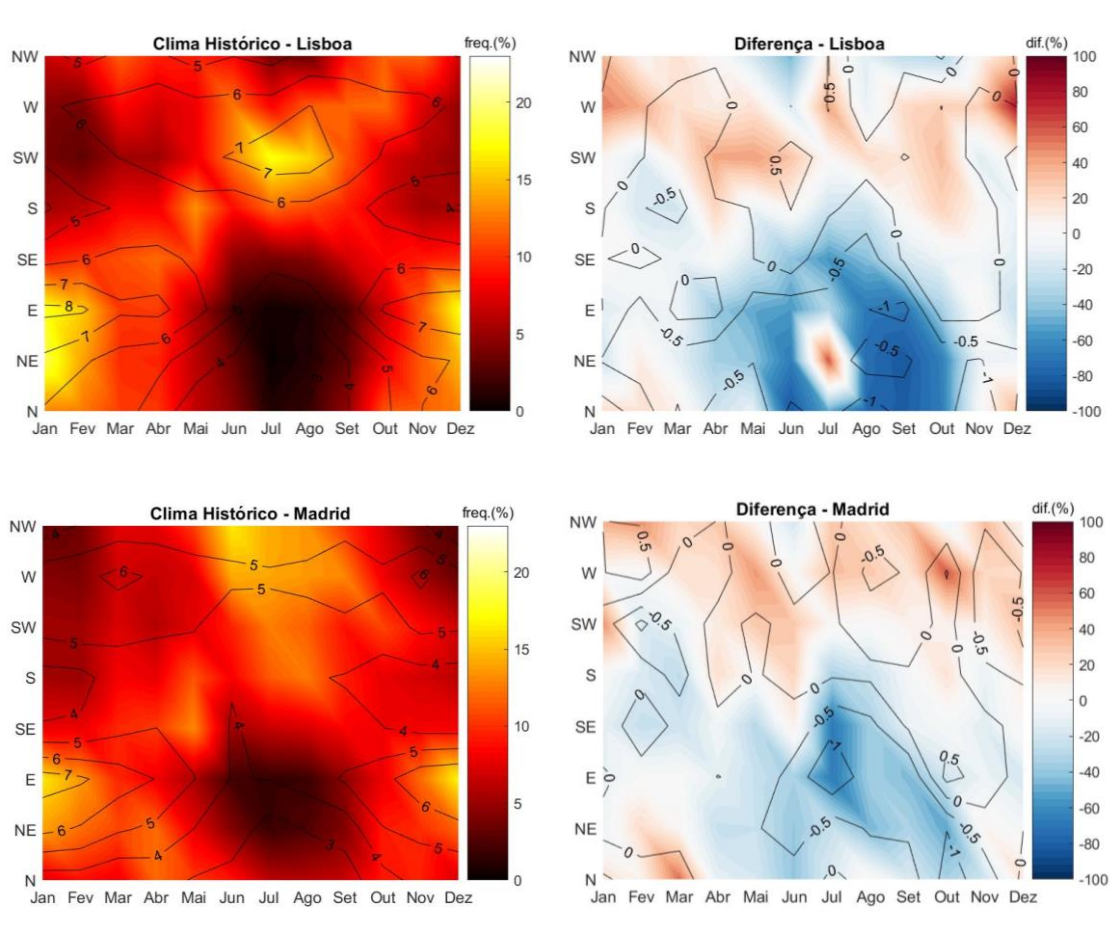


Figura 11 Intensidade e frequência do vento para cada mês e direção, para Lisboa e Madrid para o clima histórico (esquerda) e diferenças (%) futuro-histórico (direita).

Em Bilbao espera-se que aumente o número de instantes de tempo em que o vento é de W durante o mês de dezembro e que diminua para os ventos de N durante agosto. A intensidade do vento deverá diminuir ligeiramente.

Em Braga espera-se que aumentem os ventos vindos de NW, W e SW na maioria dos meses, e que diminuam os ventos vindos de S em fevereiro. A intensidade do vento diminuirá em quase todo o seu domínio, ligeiramente.

Em Bragança espera-se uma maior frequência de ventos vindos de W e SW. De uma forma geral, a intensidade diminuirá exceto para ventos de W e SW em que deve aumentar, ligeiramente.

O caso de Castelo Branco e Coimbra são iguais ao de Bragança, com a exceção de que apenas se espera um ligeiro aumento da intensidade do vento para ventos vindos de W em Castelo Branco e não se espera que a intensidade do vento aumente em Coimbra.

Évora apresenta ventos predominantemente de SE no verão e de E, NE e N no inverno. Espera-se que o padrão das direções se intensifique no verão e que diminua no inverno. Já a intensidade do vento, espera-se que diminua para ventos de E, NE e N, e que aumente para ventos de NW e W, ligeiramente.

Em Faro é esperado que o padrão de ventos se desvaneça no futuro, com um aumento no número de vezes em que é registado vento vindo das restantes direções. A intensidade do vento é superior no inverno para ventos de NE e espera-se que esta diminua ligeiramente para todas as direções e meses.

Na Guarda espera-se um intensificar do padrão de ventos de verão, e um aproximar às características de verão dos meses de primavera e outono. A intensidade do vento deverá diminuir pouco.

Em Leiria espera-se que no futuro haja mais ventos de W, SW e S para os meses de outubro e novembro, bem como ventos de S em junho. Espera-se que diminuam os ventos de E, NE e N nos meses de primavera, verão e outono. Espera-se ainda uma diminuição ligeira da intensidade do vento

No Lugo espera-se um acentuar do padrão de direções de vento durante o verão, contrariamente ao que se observa no inverno. A intensidade do vento diminuirá ligeiramente exceto para ventos de S e SE onde se prevê um pequeno aumento.

Em Múrcia espera-se que no futuro, os ventos de S, SE e NE ocorram mais vezes, principalmente de junho a novembro, e que os ventos de W ocorram mais vezes nos restantes meses. A intensidade do vento deverá diminuir ligeiramente.

Em Portalegre espera-se que de uma forma geral os ventos de W e SW ocorram mais vezes e que a intensidade do vento para essas direções aumente.

No Porto espera-se que no futuro aumentem os ventos de W em janeiro e diminuam os ventos de NE e N em junho, agosto, setembro e outubro. É esperado que a intensidade do vento diminua exceto para ventos de S, SE e E para os meses de novembro e dezembro.

Em Santarém espera-se que os ventos de NW, W e SW aumentem a sua frequência, ao contrário dos ventos de NE e N em junho, agosto, setembro e outubro. Espera-se uma diminuição na intensidade do vento exceto em janeiro e fevereiro para ventos de NW.

No futuro, em Saragoça, prevê-se que os ventos de S aumentem para junho, e os ventos de NW e W para os meses de julho e agosto. Espera-se uma diminuição da intensidade do vento exceto em outubro para ventos de SW.

Em Setúbal espera-se, de uma forma geral, um aumento no número de ocorrências do vento de W e SW, e uma diminuição dos ventos vindos de E, NE e N principalmente nos meses de junho, agosto, setembro e outubro. A intensidade do vento deverá diminuir exceto para ventos de NW, W e SW.

Em Sevilha, espera-se que no futuro venha a ser ainda mais acentuado o padrão de direções do vento e que a intensidade do vento diminua exceto em março para ventos de NW.

Valência apresenta características muito semelhantes a Múrcia.

Para Viana do Castelo prevê-se um aumento dos ventos de SW na maioria dos meses e de NW, W e S em janeiro. A intensidade do vento deverá diminuir exceto para ventos de SW e W a partir de maio.

Em Vila Real, espera-se principalmente um aumento no número de vezes em que se encontra vento proveniente de W em junho e julho, e irá diminuir a frequência de ventos E e NE principalmente nos meses entre junho e novembro. Espera-se que a intensidade dos ventos diminua exceto quando estes são provenientes de W no outono.

Em Viseu, espera-se que os ventos de W e SW aumentem de frequência durante todo o ano. A intensidade do vento deverá diminuir ligeiramente.

5.1.3 – Rosa dos ventos

Nesta secção encontram-se representadas duas rosas dos ventos para cada cidade: uma para o clima histórico e uma para o clima futuro. Nelas podemos verificar quais as direções mais frequentes da proveniência do vento, bem como quais as intensidades do vento verificadas para cada direção.

A Figura 12 mostra as rosas dos ventos para Lisboa e Madrid, sendo que as restantes cidades podem ser consultadas em anexo na Figura A3.

Em Lisboa os ventos são predominantemente de NE, seguidos por ventos de WNW. Espera-se que a frequência dos ventos de WNW diminua e que a frequência dos ventos de NE aumente, onde se espera também um aumento dos ventos cuja intensidade varia entre 8 e 14 m/s.

Já em Madrid, os ventos provêm principalmente de WSW mas também de direções entre NE e SE. Verifica-se que os ventos entre NE e SE aumentaram de frequência, ao contrário dos ventos de WSW onde se prevê uma diminuição no número de ocorrências.

Em Aveiro espera-se uma maior frequência dos ventos de Oeste e uma maior frequência para ventos mais intensos nas direções predominantes.

Em Barcelona, espera-se que a frequência dos ventos de SSE aumente ligeiramente.

Em Beja, espera-se que a frequência dos ventos de W diminua e que aumente a frequência dos ventos de NEE.

Em Bilbao, os ventos são maioritariamente de SSW, tal como no futuro. A sua frequência mantém-se relativamente parecida à do passado, com um aumento de frequência para ventos provenientes mais a Sul.

Em Braga, espera-se que a frequência dos ventos de WNW e SSW diminua, e que aumente ligeiramente a frequência dos ventos de ESE.

Em Bragança os ventos provenientes de W irão diminuir em frequência. Espera-se um ligeiro aumento na frequência dos ventos de E. Verifica-se uma diminuição na frequência dos ventos mais intensos.

Em Castelo Branco, a frequência dos ventos de NE irá aumentar, bem como dos ventos de WSW.

Em Coimbra espera-se que a frequência dos ventos de NE e S aumente.

Em Évora espera-se que a frequência dos ventos entre NE e E aumente, enquanto que a frequência dos ventos de W deverá diminuir.

Para Faro espera-se um ligeiro aumento na frequência dos ventos entre N e E, e uma pequena diminuição nos ventos das restantes direções.

Na Guarda os ventos são predominantemente de Sul, onde se verificará um aumento de frequência. Os ventos de NE também tenderão a aumentar de frequência, enquanto que os de WNW deverão diminuir.

Em Leiria, espera-se uma diminuição na frequência dos ventos entre WNW e WSW e um aumento na frequência dos ventos de NE.

No Lugo os ventos de N e ENE aumentarão significativamente de frequência, enquanto que os de SE manterão e os de SW diminuirão.

Múrcia não apresenta alterações significativas, apenas um aumento quase impercetível no aumento da frequência dos ventos de SW.

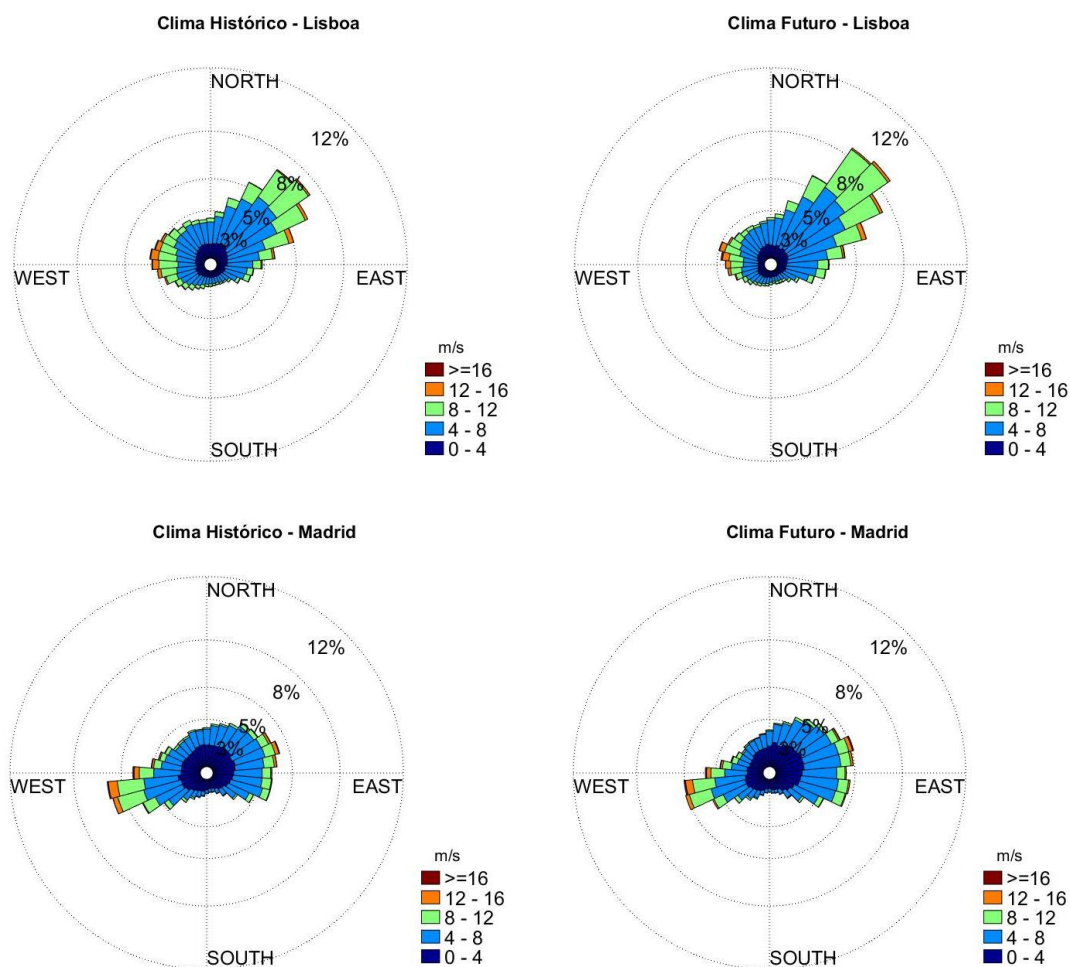


Figura 12 Rosa dos ventos para o vento à superfície, para os climas histórico (esquerda) e futuro (direita), para Lisboa (cima) e Madrid (baixo).

Portalegre, apresenta ventos vindos maioritariamente de W e de entre NE e ESE. Para ambas as direções, prevê-se um aumento na frequência de ventos mais intensos, e um notório aumento na frequência dos ventos provenientes das direções entre NE e ESE.

No Porto espera-se que os ventos cujas direções variam entre NW e SW diminuam a sua frequência e que aumente ligeiramente a frequência dos ventos de N e E.

Em Santarém preve-se um aumento de frequência dos ventos de NE e NEE, e uma diminuição quando provenientes de W.

Em Saragoça, espera-se uma diminuição na frequência dos ventos de WSW e um aumento na frequência dos ventos entre NEE e ESE.

Para Setúbal espera-se que a frequências dos ventos de W diminua, ao contrário do que acontecerá com os ventos de NE, onde o aumento de frequência é considerável.

Em Sevilha não se verificam grandes alterações entre o clima histórico e futuro. Os ventos são predominantemente de WSW e NEE. A tendência é para que a frequência dos ventos de WSW diminua e de NEE aumente.

Em Valencia também não são esperadas alterações significativas. O vento é maioritariamente de WSW e E e para ambas as direções é esperada uma diminuição de frequência.

Para Viana do Castelo espera-se que a frequência de ventos vindos de ENE e SW diminua, bem como dos ventos vindos de SW. Já para os ventos de ENE é esperado um aumento considerável na sua frequência.

Em Vila Real não são esperadas diferenças notórias. É esperado que os ventos vindos das direções predominantes (entre NW e SW) aumentem ligeiramente.

Em Viseu espera-se que os ventos entre NW e N diminuam de frequência, enquanto que para os ventos de N (inclusive) até NE prevê-se um aumento de frequência. Também se espera um aumento na frequência de intensidades de vento entre os 0 e 5 m/s.

5.2 – Vento na atmosfera livre

5.2.1 – Intensidade do vento aos 850 hPa

A Tabela 4, mostra a intensidade do vento médio mensal e anual aos 850 hPa para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico.

Seguindo a tendência do vento à superfície, a 850 hPa, são somente observadas diferenças negativas estatisticamente significativas para todas as cidades e sobretudo para o verão (56% das diferenças) e outubro (38% das diferenças) e para condições anuais (77% das diferenças).

Conclui-se, portanto, que de uma forma geral a intensidade do vento diminuirá no futuro aos 850 hPa sem grande distinção entre cidades no verão, outubro e ano. Diferenças entre a intensidade do vento à superfície e a 850 representam, em grande medida, os efeitos da camada limite na atmosfera. Pode afirmar-se que os 850 hPa representam a base da atmosfera livre.

Tabela 4 Intensidade do vento médio mensal e anual aos 850 hPa para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

		Meses												
CIDADES		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Braga	MPI-hist	12,69	12,01	10,70	9,38	7,63	6,61	6,41	6,44	7,33	9,29	10,83	12,09	9,27
	Difer.	0,06	0,45	-0,04	-0,12	0,00	-0,42	-0,53	-0,96	-0,88	-1,60	0,12	0,14	-0,32
Viana do castelo	MPI-hist	12,99	12,27	10,93	9,44	7,64	6,50	6,03	6,19	7,31	9,43	11,13	12,49	9,35
	Difer.	0,01	0,43	-0,17	-0,13	-0,10	-0,53	-0,47	-1,04	-1,01	-1,65	0,14	0,09	-0,38
Vila Real	MPI-hist	12,59	11,95	10,70	9,59	7,93	7,09	7,29	7,12	7,63	9,33	10,66	11,89	9,47
	Difer.	0,08	0,48	0,18	0,08	0,18	-0,23	-0,48	-0,77	-0,61	-1,39	0,16	0,17	-0,18
Bragança	MPI-hist	11,89	11,16	10,06	8,83	7,21	6,13	5,78	5,97	6,86	8,57	9,99	11,08	8,62
	Difer.	-0,45	0,11	-0,21	-0,01	-0,06	-0,67	-0,48	-1,10	-0,75	-1,16	-0,08	-0,18	-0,42
Porto	MPI-hist	12,60	12,00	10,77	9,46	7,73	6,61	6,62	6,54	7,39	9,20	10,71	11,93	9,29
	Difer.	0,21	0,45	-0,02	-0,19	0,04	-0,26	-0,55	-0,89	-0,86	-1,51	0,14	0,24	-0,27
Aveiro	MPI-hist	12,95	12,32	10,98	9,71	7,94	6,80	7,03	6,77	7,56	9,28	10,90	12,11	9,52
	Difer.	0,26	0,42	0,10	-0,26	0,11	-0,07	-0,54	-0,64	-0,85	-1,43	0,14	0,18	-0,22
Viseu	MPI-hist	10,51	9,99	8,99	7,97	6,70	5,80	5,50	5,59	6,25	7,76	9,00	9,70	7,80
	Difer.	-0,12	-0,26	-0,23	-0,10	-0,09	-0,41	-0,32	-0,78	-0,50	-1,16	-0,25	-0,14	-0,36
Guarda	MPI-hist	10,25	9,88	9,10	8,26	7,11	5,95	5,69	5,77	6,35	7,86	9,07	9,50	7,89
	Difer.	-0,10	-0,32	-0,27	0,11	-0,19	-0,49	-0,31	-0,91	-0,42	-1,14	-0,44	-0,30	-0,40
Coimbra	MPI-hist	10,10	9,75	8,82	8,08	6,87	5,79	5,41	5,48	6,17	7,53	8,75	9,39	7,67
	Difer.	0,01	-0,32	-0,24	-0,28	-0,21	-0,40	-0,34	-0,78	-0,57	-1,12	-0,37	-0,25	-0,41
Castelo Branco	MPI-hist	9,84	9,57	8,65	8,05	6,74	5,53	4,97	5,17	5,94	7,50	8,62	9,16	7,47
	Difer.	0,06	-0,17	-0,12	-0,36	-0,36	-0,60	-0,28	-0,76	-0,50	-1,21	-0,33	-0,12	-0,40
Leiria	MPI-hist	10,17	9,85	8,96	8,33	7,08	5,88	5,44	5,53	6,19	7,65	8,85	9,49	7,77
	Difer.	0,04	-0,36	-0,35	-0,45	-0,33	-0,39	-0,40	-0,78	-0,52	-1,13	-0,35	-0,31	-0,45
Santarém	MPI-hist	9,87	9,62	8,73	8,19	6,89	5,69	5,11	5,23	6,01	7,53	8,74	9,25	7,56
	Difer.	0,09	-0,31	-0,25	-0,54	-0,40	-0,43	-0,17	-0,57	-0,46	-1,19	-0,42	-0,31	-0,41
Lisboa	MPI-hist	10,01	9,88	8,88	8,45	7,13	5,79	5,28	5,33	6,08	7,63	8,88	9,42	7,72
	Difer.	0,11	-0,47	-0,34	-0,66	-0,47	-0,36	-0,07	-0,47	-0,36	-1,22	-0,49	-0,50	-0,44
Portalegre	MPI-hist	10,32	10,07	8,97	8,58	7,13	5,63	5,13	5,18	5,99	7,70	8,93	9,47	7,75
	Difer.	-0,03	-0,24	-0,17	-0,62	-0,58	-0,61	-0,15	-0,51	-0,45	-1,37	-0,45	-0,30	-0,46
Évora	MPI-hist	10,53	10,38	9,02	8,81	7,17	5,43	5,02	5,09	5,88	7,60	9,04	9,59	7,78
	Difer.	-0,08	-0,46	-0,18	-0,84	-0,69	-0,43	-0,14	-0,49	-0,52	-1,38	-0,55	-0,53	-0,52
Setúbal	MPI-hist	10,19	10,11	8,95	8,61	7,20	5,68	5,17	5,25	5,99	7,61	8,97	9,47	7,75
	Difer.	0,06	-0,50	-0,29	-0,75	-0,55	-0,37	-0,08	-0,51	-0,38	-1,29	-0,51	-0,54	-0,48
Beja	MPI-hist	10,80	10,59	9,08	9,01	7,21	5,27	5,14	5,02	5,79	7,47	9,05	9,70	7,83
	Difer.	-0,20	-0,53	-0,15	-0,95	-0,74	-0,32	-0,32	-0,44	-0,53	-1,34	-0,56	-0,74	-0,57
Faro	MPI-hist	9,68	9,29	7,94	8,18	6,49	5,58	4,78	5,12	5,83	7,38	8,39	9,06	7,30
	Difer.	-0,17	-0,47	0,35	-0,76	-0,38	-0,23	-0,06	-0,99	-0,43	-1,40	-0,84	-0,86	-0,52
Lugo	MPI-hist	13,60	13,00	11,56	9,86	8,11	6,97	6,55	6,78	7,92	10,13	11,79	13,15	9,94
	Difer.	-0,10	0,46	-0,03	0,20	0,00	-0,61	-0,74	-1,39	-1,04	-1,74	0,13	0,11	-0,40
Bilbau	MPI-hist	12,17	11,40	10,30	8,80	7,72	7,01	7,51	7,39	7,82	9,07	10,31	11,63	9,25
	Difer.	-0,34	0,62	0,20	0,83	0,52	0,12	-0,26	-0,93	-0,57	-1,04	0,00	0,03	-0,08
Saragoça	MPI-hist	12,47	11,81	10,27	9,81	7,99	6,30	5,83	6,22	6,93	8,73	10,43	12,00	9,05
	Difer.	-0,92	0,14	-0,18	-0,62	-0,52	-0,69	-0,40	-1,40	-0,77	-0,96	-0,13	-0,92	-0,62
Barcelona	MPI-hist	10,74	10,01	8,68	7,98	6,51	5,35	4,78	5,22	6,01	7,51	8,97	10,61	7,69
	Difer.	-0,47	0,44	0,19	-0,28	-0,28	-0,64	-0,47	-1,33	-1,01	-1,06	-0,02	-0,82	-0,49
Madrid	MPI-hist	10,70	10,36	9,21	8,33	7,11	5,56	5,47	5,53	6,37	7,72	9,14	9,76	7,93
	Difer.	-0,32	-0,12	-0,20	0,12	-0,27	-0,40	-0,37	-0,73	-0,83	-0,94	-0,54	-0,30	-0,41
Valência	MPI-hist	10,74	10,09	8,49	8,17	6,20	5,25	4,57	4,72	5,57	7,13	8,60	10,20	7,46
	Difer.	-0,54	0,22	0,14	-0,74	-0,36	-0,60	0,04	-0,77	-0,85	-1,31	0,02	-0,97	-0,48
Múrcia	MPI-hist	10,24	9,67	8,19	7,92	6,11	5,10	4,45	4,69	5,44	7,07	8,36	9,46	7,21
	Difer.	-0,42	-0,18	0,17	-0,73	-0,38	-0,40	0,05	-0,57	-0,60	-1,27	-0,33	-0,94	-0,47
Sevilha	MPI-hist	9,65	9,08	7,71	7,80	6,12	5,41	4,62	4,91	5,64	7,21	8,26	8,84	7,09
	Difer.	-0,39	-0,32	0,40	-0,69	-0,42	-0,39	0,20	-0,68	-0,37	-1,26	-0,68	-0,77	-0,45

5.2.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa

Na tabela relativa à intensidade do vento aos 300 hPa (Tabela 5) observa-se uma evidente distinção entre os meses entre junho e outubro e os restantes. Entre junho e outubro as diferenças são negativas e significativas, enquanto para os restantes meses as diferenças são positivas, mas raramente significativas. Os resultados apresentados pela coluna dos dados anuais são todos eles positivos, mas não estatisticamente significativos. Relativamente às cidades, não se encontra um padrão notório.

Tabela 5 Intensidade do vento médio mensal e anual aos 300 hPa para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

		Meses												
CIDADES		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Braga	MPI-hist	28,21	27,46	24,36	24,07	21,47	18,23	19,51	18,68	20,19	23,37	24,76	26,45	23,04
	Difer.	2,83	3,15	2,76	1,57	2,14	0,16	-3,09	-3,24	-2,31	-2,06	3,18	1,76	0,55
Viana do castelo	MPI-hist	28,20	27,42	24,30	24,07	21,47	18,15	19,31	18,62	20,20	23,48	24,83	26,49	23,03
	Difer.	2,88	3,16	2,74	1,40	1,96	0,15	-2,96	-3,29	-2,41	-2,15	3,18	1,85	0,52
Vila Real	MPI-hist	28,17	27,43	24,36	24,07	21,48	18,39	19,90	18,91	20,30	23,30	24,68	26,33	23,09
	Difer.	2,92	3,40	3,02	1,96	2,47	0,24	-3,18	-3,09	-2,27	-1,67	3,37	1,87	0,73
Bragança	MPI-hist	28,01	27,29	24,05	23,54	21,07	18,02	19,44	18,73	20,07	23,16	24,63	26,32	22,84
	Difer.	2,54	3,07	2,50	1,78	2,23	0,33	-3,36	-3,44	-2,30	-1,92	2,93	1,46	0,46
Porto	MPI-hist	27,95	27,35	24,43	24,34	21,61	18,39	19,58	18,62	20,13	23,28	24,59	26,16	23,02
	Difer.	2,91	3,28	2,90	1,58	2,28	0,01	-3,09	-3,11	-2,37	-2,06	3,15	1,82	0,59
Aveiro	MPI-hist	27,70	27,27	24,42	24,62	21,82	18,51	19,68	18,57	20,01	23,05	24,29	25,71	22,95
	Difer.	3,02	3,28	3,12	1,56	2,45	-0,05	-3,07	-2,86	-2,44	-1,85	3,16	1,89	0,67
Viseu	MPI-hist	28,29	27,81	24,63	24,70	21,57	18,07	19,23	18,13	19,56	22,92	24,52	26,03	22,93
	Difer.	2,53	2,77	2,70	1,09	2,09	-0,16	-3,43	-2,97	-2,44	-1,94	2,88	1,37	0,36
Guarda	MPI-hist	28,00	27,41	24,18	24,09	21,09	17,90	19,06	18,00	19,27	22,48	24,04	25,71	22,58
	Difer.	2,36	2,67	2,73	1,29	2,23	-0,12	-3,52	-2,93	-2,35	-1,67	2,85	1,18	0,38
Coimbra	MPI-hist	28,09	27,64	24,55	24,73	21,45	17,88	18,83	17,63	19,08	22,45	24,08	25,62	22,65
	Difer.	2,29	2,45	2,51	0,81	1,94	-0,33	-3,33	-2,72	-2,50	-1,98	2,69	1,08	0,23
Castelo Branco	MPI-hist	27,97	27,66	24,55	24,85	21,56	18,05	18,84	17,66	18,98	22,09	23,72	25,32	22,58
	Difer.	2,17	2,33	2,54	0,96	2,03	-0,35	-3,19	-2,54	-2,55	-1,55	2,76	1,02	0,29
Leiria	MPI-hist	27,98	27,66	24,65	24,98	21,59	17,94	18,71	17,48	18,96	22,34	23,98	25,40	22,61
	Difer.	2,27	2,34	2,48	0,69	1,90	-0,47	-3,10	-2,52	-2,56	-1,93	2,53	1,08	0,21
Santarém	MPI-hist	27,84	27,65	24,69	25,24	21,80	18,01	18,60	17,35	18,79	22,01	23,70	25,09	22,54
	Difer.	2,13	2,20	2,39	0,63	1,82	-0,42	-2,92	-2,30	-2,60	-1,71	2,41	0,90	0,20
Lisboa	MPI-hist	27,67	27,70	24,81	25,68	22,20	18,19	18,50	17,26	18,67	21,84	23,60	24,85	22,55
	Difer.	2,12	2,13	2,38	0,56	1,60	-0,37	-2,59	-2,00	-2,58	-1,55	2,14	0,77	0,20
Portalegre	MPI-hist	27,85	27,71	24,69	25,18	21,99	18,28	18,72	17,63	18,88	21,85	23,61	25,08	22,60
	Difer.	2,07	2,23	2,47	0,99	1,95	-0,31	-2,83	-2,37	-2,52	-1,24	2,62	0,90	0,32
Évora	MPI-hist	27,82	27,93	25,00	25,95	22,74	18,57	18,68	17,46	18,66	21,68	23,60	24,84	22,72
	Difer.	1,95	2,14	2,35	0,86	1,54	-0,28	-2,51	-2,00	-2,48	-1,13	2,31	0,72	0,28
Setúbal	MPI-hist	27,68	27,77	24,87	25,84	22,43	18,32	18,56	17,28	18,57	21,75	23,55	24,81	22,59
	Difer.	2,06	2,10	2,36	0,62	1,53	-0,32	-2,56	-1,95	-2,49	-1,41	2,13	0,69	0,22
Beja	MPI-hist	27,90	28,24	25,30	26,52	23,41	18,76	18,72	17,40	18,52	21,53	23,68	24,79	22,87
	Difer.	1,90	2,04	2,25	0,86	1,27	-0,02	-2,34	-1,75	-2,35	-0,95	2,07	0,56	0,28
Faro	MPI-hist	25,92	25,54	22,85	24,38	20,09	16,15	15,34	14,81	16,20	20,54	22,88	23,67	20,67
	Difer.	2,40	2,72	2,33	0,06	0,57	-1,53	-1,81	-1,86	-1,75	-2,61	0,74	0,06	-0,07
Lugo	MPI-hist	28,46	27,34	24,11	23,14	21,24	18,51	19,62	19,61	20,79	24,09	25,21	27,11	23,25
	Difer.	2,62	3,34	2,57	2,09	1,78	0,32	-2,52	-3,86	-2,18	-2,23	3,41	2,04	0,59
Bilbau	MPI-hist	28,06	27,20	23,83	22,25	20,51	18,97	20,63	20,53	21,55	23,67	25,14	26,84	23,25
	Difer.	2,43	3,69	2,81	3,46	3,40	0,89	-2,85	-3,92	-2,46	-1,38	2,57	2,20	0,88
Saragoça	MPI-hist	28,96	27,62	24,35	23,59	21,21	18,02	17,38	18,25	19,81	23,74	25,72	27,67	23,01
	Difer.	1,81	3,35	2,89	1,94	1,46	-1,25	-2,00	-4,05	-2,70	-2,19	3,00	1,36	0,28
Barcelona	MPI-hist	28,74	27,28	24,44	22,80	20,70	17,94	17,16	18,08	19,90	23,42	25,65	27,12	22,75
	Difer.	1,78	3,50	3,09	2,18	1,89	-0,76	-1,93	-3,80	-2,89	-2,25	2,53	1,71	0,40
Madrid	MPI-hist	27,97	27,59	24,44	23,94	21,40	18,48	19,38	18,59	19,72	21,91	23,72	25,25	22,67
	Difer.	1,88	2,56	2,70	2,20	2,75	0,26	-3,67	-3,01	-3,09	-0,85	2,70	1,24	0,46
Valência	MPI-hist	28,36	27,00	23,99	23,30	20,44	17,19	16,65	16,62	18,35	21,74	24,53	25,38	21,94
	Difer.	1,70	3,22	2,77	1,93	2,13	-0,99	-2,57	-2,82	-2,48	-1,75	1,98	1,32	0,35
Múrcia	MPI-hist	27,92	26,89	24,08	24,17	20,66	17,15	16,84	16,03	17,60	21,06	23,83	24,38	21,69
	Difer.	1,47	2,97	2,83	1,44	1,89	-1,04	-2,50	-1,64	-2,14	-1,77	1,79	0,88	0,33
Sevilha	MPI-hist	26,49	25,84	22,98	24,26	20,19	16,52	15,70	15,07	16,40	20,51	23,06	23,88	20,88
	Difer.	2,04	2,77	2,46	0,46	0,90	-1,61	-2,11	-1,81	-1,70	-2,37	1,05	0,13	0,00

No total, encontram-se a preenchido 76 células, sendo que na coluna de dados anuais nenhuma célula está preenchida. No mês de julho e agosto todos os valores são estatisticamente significativos exceto duas cidades no mês de julho.

Conclui-se, portanto, que a intensidade do vento aos 300 hPa irá diminuir de forma significativa entre junho e outubro embora os restantes meses mostrem diferenças positivas, mas não significativas.

5.3 – Vento de corte e helicidade

5.3.1 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)

A Tabela 6 mostra a intensidade do vento de corte para a camada dos 0 aos 6 km para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico.

Tabela 6 Intensidade do vento de corte médio mensal e anual dos 0 aos 6 km para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

		Meses												
CIDADES		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Braga	MPI-hist	17,05	16,73	15,42	14,83	13,51	12,27	13,71	12,74	12,56	14,16	14,82	15,98	14,47
	Difer.	1,41	1,34	0,81	1,03	1,60	0,99	-1,10	-1,22	-0,98	-1,75	1,35	0,64	0,33
Viana do castelo	MPI-hist	15,97	15,41	14,34	13,84	12,70	12,73	14,01	12,94	12,58	13,30	13,66	15,00	13,87
	Difer.	1,34	1,44	1,03	0,91	1,64	1,01	-0,25	-0,37	-0,46	-1,46	1,52	0,65	0,58
Vila Real	MPI-hist	17,31	16,73	15,59	15,15	13,43	12,72	13,78	12,72	12,76	14,29	15,06	15,98	14,62
	Difer.	1,58	1,66	0,99	0,73	1,75	0,50	-1,09	-1,07	-0,94	-1,66	1,37	1,13	0,40
Bragança	MPI-hist	18,98	18,55	16,40	15,54	13,77	12,47	12,86	12,29	13,06	15,22	16,49	17,83	15,27
	Difer.	1,08	1,30	0,95	0,95	1,14	-0,10	-0,90	-1,57	-1,53	-1,87	1,11	0,87	0,11
Porto	MPI-hist	16,11	15,86	14,88	14,53	13,20	12,24	13,41	12,35	12,41	13,86	14,33	15,12	14,02
	Difer.	1,84	1,65	1,28	1,06	1,86	0,64	-1,11	-1,18	-1,02	-1,60	1,53	1,02	0,49
Aveiro	MPI-hist	14,90	14,56	14,08	13,74	12,55	12,48	13,68	12,22	11,93	12,74	13,19	13,80	13,32
	Difer.	1,36	1,08	0,91	0,93	2,12	0,65	-0,64	-0,31	-0,77	-1,16	1,03	0,41	0,46
Viseu	MPI-hist	18,30	17,72	16,20	15,87	14,03	13,30	14,51	13,18	13,12	14,53	15,41	16,85	15,24
	Difer.	1,58	1,93	1,53	0,79	2,00	0,64	-1,02	-0,74	-1,26	-1,61	1,67	1,25	0,55
Guarda	MPI-hist	17,81	17,06	15,91	15,52	13,83	13,12	14,70	13,37	12,99	13,74	14,77	16,06	14,90
	Difer.	0,73	1,67	0,92	0,99	2,11	0,89	-0,99	-0,58	-1,31	-1,05	1,33	0,63	0,44
Coimbra	MPI-hist	16,75	16,37	15,72	15,61	14,28	13,63	15,46	14,12	13,28	13,68	14,11	15,11	14,84
	Difer.	1,37	1,71	1,25	1,08	2,39	0,87	-1,30	-0,55	-1,04	-1,14	1,37	0,78	0,56
Castelo Branco	MPI-hist	16,83	16,46	15,81	15,72	14,17	14,19	16,05	14,61	13,70	14,15	14,40	15,11	15,10
	Difer.	1,65	1,80	1,65	1,19	2,39	1,01	-0,65	0,04	-0,96	-0,98	1,74	1,64	0,87
Leiria	MPI-hist	16,03	15,73	15,19	15,19	13,89	13,55	15,52	14,07	12,89	13,26	13,59	14,50	14,45
	Difer.	1,62	1,48	1,25	0,93	2,47	0,94	-1,18	-0,17	-0,77	-1,19	1,03	0,60	0,58
Santarém	MPI-hist	16,19	15,90	15,50	15,44	13,98	13,81	15,94	14,52	13,32	13,64	13,86	14,61	14,72
	Difer.	1,73	1,84	1,47	1,00	2,40	1,11	-0,79	0,15	-0,86	-0,77	1,63	1,46	0,86
Lisboa	MPI-hist	15,72	15,50	15,35	15,38	14,14	14,79	17,31	15,65	13,74	13,64	13,57	14,13	14,91
	Difer.	1,82	2,03	1,64	1,19	2,79	1,65	-0,04	0,85	-0,45	-0,48	1,81	1,52	1,19
Portalegre	MPI-hist	16,09	15,80	15,48	15,71	14,49	15,09	17,40	15,80	13,96	13,82	13,69	14,33	15,14
	Difer.	1,62	1,92	1,60	1,39	2,65	1,55	-0,16	0,54	-0,67	-0,55	1,84	1,49	1,09
Évora	MPI-hist	15,72	15,59	15,42	15,77	14,61	15,44	17,98	16,35	13,99	13,67	13,34	13,89	15,15
	Difer.	1,55	1,80	1,62	1,40	2,79	2,01	0,15	0,97	-0,40	-0,25	1,88	1,38	1,24
Setúbal	MPI-hist	15,48	15,37	15,29	15,41	14,32	15,22	17,82	16,13	13,93	13,56	13,33	13,82	14,97
	Difer.	1,79	1,98	1,68	1,34	2,90	1,87	0,13	1,01	-0,37	-0,24	1,85	1,43	1,28
Beja	MPI-hist	15,61	15,49	15,28	15,68	14,70	15,17	17,45	15,95	13,48	13,41	13,18	13,53	14,91
	Difer.	1,38	1,71	1,49	1,46	2,69	2,16	0,24	1,11	-0,26	-0,19	1,64	1,23	1,22
Faro	MPI-hist	14,82	14,29	13,84	13,88	12,02	10,95	10,96	9,98	10,42	12,01	12,79	13,30	12,43
	Difer.	1,76	2,25	1,64	0,73	1,21	-0,63	-0,46	-0,31	-1,15	-1,38	0,99	1,12	0,47
Lugo	MPI-hist	19,20	18,25	16,47	15,40	13,92	13,69	14,41	13,98	14,14	15,68	16,45	17,91	15,78
	Difer.	0,83	1,30	1,16	1,08	1,42	0,30	0,00	-1,22	-0,99	-1,65	1,87	1,51	0,46
Bilbau	MPI-hist	18,88	18,36	16,59	14,76	13,61	13,23	14,21	13,85	14,05	15,33	16,59	17,90	15,60
	Difer.	0,58	1,51	0,45	2,20	2,43	0,92	-1,01	-2,09	-1,27	-1,08	0,50	0,90	0,32
Saragoça	MPI-hist	17,38	16,60	15,11	13,54	12,30	11,41	11,05	11,44	12,30	13,97	15,47	16,50	13,91
	Difer.	0,86	1,57	0,99	1,66	1,43	-0,44	-0,51	-2,05	-1,70	-1,53	1,35	1,43	0,25
Barcelona	MPI-hist	19,87	19,09	17,58	16,11	14,53	13,18	12,64	13,36	14,47	16,31	17,66	18,69	16,11
	Difer.	0,92	1,82	1,78	1,73	1,61	-0,48	-1,18	-2,86	-2,43	-1,91	1,54	1,85	0,19
Madrid	MPI-hist	17,55	17,29	16,11	15,27	13,91	13,99	15,91	14,64	13,85	13,95	14,70	15,71	15,23
	Difer.	0,71	1,06	1,07	1,65	2,78	1,33	-1,31	-0,67	-1,59	-0,60	1,34	0,96	0,56
Valência	MPI-hist	19,19	18,05	16,62	15,35	13,45	11,88	11,43	11,40	12,77	14,76	16,88	17,47	14,92
	Difer.	1,29	2,00	1,50	1,52	1,94	-0,54	-1,21	-1,92	-2,29	-1,63	1,28	1,72	0,30
Múrcia	MPI-hist	18,16	17,17	15,79	15,22	13,14	11,02	11,08	10,38	11,75	13,30	15,11	15,85	13,98
	Difer.	0,64	1,84	1,38	1,07	1,60	-0,45	-1,53	-1,12	-2,15	-1,34	1,07	0,81	0,14
Sevilha	MPI-hist	15,95	15,18	14,34	14,11	11,99	10,63	10,57	9,70	10,33	12,41	13,57	14,28	12,74
	Difer.	1,39	1,89	1,22	0,64	1,09	-0,67	-0,79	-0,64	-1,29	-1,52	1,10	1,05	0,28

A intensidade do vento de corte apresenta diferenças negativas entre julho e setembro enquanto, nos restantes meses, as diferenças são principalmente positivas, mas somente significativas de fevereiro a maio, novembro e condições anuais.

5.3.2 – Helicidade (0-3 km)

A Tabela 7 mostra a helicidade entre os 0 e 3 km para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico.

Tabela 7 Helicidade média mensal e anual dos 0 aos 3 km para cada cidade, para o clima histórico e a diferença entre o futuro e histórico. Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

		Meses												
CIDADES		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Braga	MPI-hist	8,09	6,06	3,98	2,29	-1,43	-0,41	-3,87	-4,81	-2,19	3,27	5,07	5,80	1,80
	Difer.	-1,46	-0,47	0,39	-3,32	-2,62	-3,86	0,42	2,11	-0,63	-4,37	-0,70	1,11	-1,11
Viana do castelo	MPI-hist	5,40	4,84	4,18	3,61	4,10	10,73	14,99	11,39	6,58	4,74	1,95	2,75	6,29
	Difer.	-1,49	-1,11	1,29	-0,47	1,96	4,56	5,29	8,43	3,71	-0,35	0,70	2,14	2,08
Vila Real	MPI-hist	2,63	1,29	2,41	1,21	-1,26	4,27	7,19	4,10	2,53	1,08	0,62	0,98	2,26
	Difer.	0,14	0,67	1,11	-1,79	3,01	3,12	4,91	8,10	1,10	-0,14	1,94	3,20	2,14
Bragança	MPI-hist	24,74	20,26	17,01	8,18	4,15	1,42	0,38	-1,53	2,94	10,62	18,88	20,11	10,55
	Difer.	-1,06	-1,60	0,21	-0,05	-1,53	-0,79	4,75	5,95	-0,27	-4,68	-2,01	2,43	0,14
Porto	MPI-hist	6,64	5,92	4,92	3,70	-0,13	1,44	-1,32	-2,09	-0,10	5,42	6,04	4,85	2,92
	Difer.	1,55	1,35	2,45	-3,23	-0,84	-1,67	2,00	2,24	0,19	-4,39	0,73	4,21	0,39
Aveiro	MPI-hist	2,99	2,27	3,39	2,92	0,34	1,19	-3,07	-2,77	0,16	3,27	3,38	1,37	1,27
	Difer.	1,34	1,22	3,11	-2,06	0,39	-2,23	-0,35	-1,53	0,15	-1,16	2,11	4,94	0,50
Viseu	MPI-hist	11,69	6,07	5,37	3,30	1,79	3,22	2,50	2,32	4,55	6,47	9,60	10,42	5,61
	Difer.	-2,62	2,03	1,48	-0,69	1,67	-1,54	2,28	2,67	-2,30	-1,80	-1,59	2,20	0,15
Guarda	MPI-hist	-3,04	-4,44	-1,17	-0,51	0,59	2,59	2,28	2,17	0,50	0,62	-0,98	-4,22	-0,45
	Difer.	-1,40	-0,51	-0,62	-1,71	0,02	0,90	6,44	5,95	2,06	-2,18	-3,28	-0,63	0,44
Coimbra	MPI-hist	-0,70	-1,85	-0,87	-0,92	-0,52	0,99	-4,88	-3,99	-2,33	-0,08	-2,16	-3,46	-1,74
	Difer.	-3,54	0,29	-0,30	-1,61	-0,70	-3,60	5,25	3,68	-0,07	-1,74	-1,71	0,20	-0,31
Castelo Branco	MPI-hist	4,23	2,78	4,95	3,77	5,46	10,40	12,31	10,99	8,61	8,40	6,63	4,24	6,92
	Difer.	3,81	3,02	3,45	0,94	3,63	3,87	7,28	6,53	3,00	0,90	1,57	6,01	3,69
Leiria	MPI-hist	0,91	1,06	1,34	1,29	3,08	8,20	4,75	2,48	1,19	1,67	-0,55	-0,69	2,06
	Difer.	-1,86	-0,16	0,20	-0,45	0,54	-0,10	10,42	6,97	1,41	-0,86	-1,13	0,40	1,31
Santarém	MPI-hist	1,44	1,39	3,19	2,46	6,21	12,52	9,79	8,21	5,54	5,73	4,89	2,66	5,35
	Difer.	1,95	1,81	2,49	1,43	2,07	1,96	10,02	6,06	3,97	0,61	-0,47	4,27	3,04
Lisboa	MPI-hist	2,03	2,02	4,21	3,02	6,53	16,04	18,39	14,20	7,53	7,14	5,99	3,62	7,60
	Difer.	3,46	2,15	3,32	2,06	3,88	7,50	12,50	11,30	7,92	1,82	-0,62	4,07	4,98
Portalegre	MPI-hist	4,48	4,34	5,53	4,61	7,09	14,88	18,99	16,03	10,94	9,07	6,38	4,95	8,97
	Difer.	2,37	1,02	4,27	2,13	5,00	5,17	6,31	8,52	4,83	2,42	0,16	3,16	3,81
Évora	MPI-hist	3,73	2,64	3,49	2,11	5,93	11,88	16,27	12,21	7,22	6,87	5,90	3,77	6,87
	Difer.	1,12	0,64	4,05	2,09	3,14	5,18	3,07	10,84	7,46	2,50	-1,75	2,12	3,39
Setúbal	MPI-hist	2,54	1,91	3,31	1,86	5,13	12,68	14,95	10,71	4,99	5,99	5,11	2,96	6,04
	Difer.	1,87	0,34	2,56	1,89	3,62	6,09	7,17	10,42	8,61	1,92	-1,49	2,78	3,84
Beja	MPI-hist	3,12	1,82	1,40	-0,11	1,21	2,01	-0,71	0,27	0,21	2,80	3,35	2,96	1,53
	Difer.	-1,86	-0,96	1,80	0,21	1,40	-1,28	0,33	5,92	4,22	0,90	-3,37	-1,07	0,54
Faro	MPI-hist	2,97	1,48	4,23	2,10	2,22	2,97	2,80	2,61	2,17	3,00	4,99	3,81	2,95
	Difer.	2,71	1,73	0,84	-1,39	-0,19	0,32	0,65	0,71	0,96	-0,11	0,02	0,89	0,59
Lugo	MPI-hist	34,58	26,61	22,51	15,19	9,85	10,31	10,76	7,62	9,55	21,28	30,54	29,88	19,03
	Difer.	1,98	4,01	3,28	-2,41	0,11	0,16	9,05	10,66	2,18	-5,30	-0,96	8,17	2,60
Bilbau	MPI-hist	22,39	18,87	9,52	6,45	4,86	0,76	-3,17	-2,23	2,09	7,90	13,84	20,06	8,40
	Difer.	-4,60	-3,00	0,40	-1,78	-1,22	-2,02	-4,03	-1,10	-2,51	-3,99	-3,72	-9,37	-3,09
Saragoça	MPI-hist	-3,49	-2,77	-2,60	-1,42	-0,28	4,19	7,79	5,63	1,02	-1,49	-3,00	-4,37	-0,05
	Difer.	-1,89	-0,43	0,72	1,15	3,08	3,79	5,32	5,52	2,36	0,46	-2,41	-0,33	1,46
Barcelona	MPI-hist	5,94	4,23	2,26	3,87	0,31	2,67	2,13	1,65	4,79	3,38	6,00	7,24	3,70
	Difer.	-1,99	-2,96	-0,69	-4,60	2,41	-0,98	3,87	1,05	-0,84	0,44	0,36	-1,70	-0,44
Madrid	MPI-hist	4,16	2,21	4,31	3,31	4,63	7,98	10,96	7,56	5,46	5,53	4,98	1,71	5,25
	Difer.	3,00	0,84	2,52	1,25	4,06	3,74	2,04	6,10	2,98	1,35	0,02	4,46	2,72
Valência	MPI-hist	-6,95	-4,00	-1,78	-2,98	-1,13	3,10	5,56	3,14	2,68	-2,83	-2,56	-7,48	-1,26
	Difer.	1,68	-2,11	-0,91	2,43	3,02	0,94	3,96	4,04	0,81	3,42	-0,72	1,74	1,56
Múrcia	MPI-hist	-6,11	-6,05	-4,23	-3,72	-1,35	3,88	4,44	4,58	2,04	-3,45	-4,71	-6,43	-1,74
	Difer.	-2,19	-0,83	-0,60	0,13	1,29	1,11	6,63	2,52	2,02	3,49	-0,59	-2,09	0,92
Sevilha	MPI-hist	6,16	3,58	5,57	3,60	3,25	6,98	7,64	6,78	5,31	5,54	8,23	6,33	5,76
	Difer.	4,27	2,14	1,86	-0,49	1,91	0,89	0,77	0,84	1,29	-0,14	-1,23	2,49	1,22

Não se observa um padrão muito bem definido das diferenças, sendo que todos os meses apresentam diferenças positivas e negativas. No entanto, é notório que para os meses entre junho e setembro se observam mais diferenças positivas e estatisticamente significativas. Já para condições anuais, a maioria dos dados estatisticamente significativos apresenta sinal positivo.

É de salientar, que para as variáveis até agora analisadas, as diferenças pequenas relativamente aos valores do clima histórico enquanto para a helicidade as diferenças representam variações iguais ou superiores aos valores registados em média no clima histórico. Por exemplo, para Vila Real, Guarda, Leiria e Beja, no mês de agosto, as diferenças excedem o dobro do valor da média do clima histórico.

Pode concluir-se que, de uma forma geral, a helicidade tenderá a aumentar, em algumas regiões mais de 200% face ao valor médio do clima histórico. Para algumas cidades haverá diminuição da helicidade, como é o caso Braga, Bragança, Guarda, Coimbra e Bilbao. É de salientar que, embora a Guarda apresente maioritariamente diferenças negativas (não significativas), observam-se diferenças positivas significativas superiores a 200% em julho e agosto.

5.3.3 – Hodógrafo

A Figura 13 mostra os hodógrafos para as cidades de Lisboa e Madrid, dos 0 aos 6 km, para os climas histórico e futuro.

De uma forma geral, os hodógrafos apresentam todos resultados muito semelhantes, com valores a variar entre os 75° e os 105°. A evolução temporal é igual para todas as cidades. Verifica-se que o hodógrafo do clima futuro se encontra acima do hodógrafo do clima histórico, uma vez que os valores da direção são menores no clima futuro. Para altitudes menores os hodógrafos encontram-se quase sempre sobrepostos (0-2km). À medida que a altitude aumenta, as linhas afastam-se. Os hodógrafos das restantes cidades encontram-se na Figura A4 em anexo.

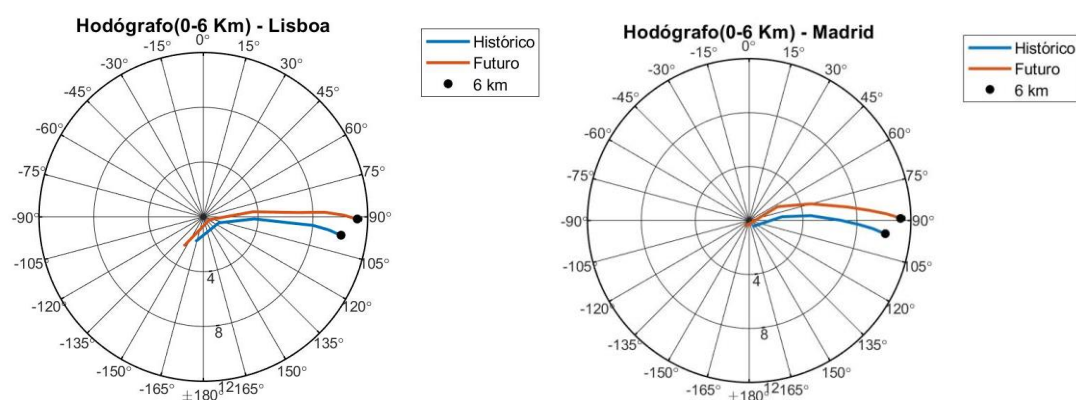


Figura 13 Hodógrafos para as cidades de Lisboa (esquerda) e Madrid (direita) dos 0 aos 6 km, para o clima histórico (azul) e para o clima futuro (vermelho).

Capítulo 6 | Eventos extremos

Como referido anteriormente, o clima engloba a descrição de como a atmosfera se comporta ao longo de um período (normalmente um período de 30 anos), informando-nos da “média do tempo” bem como outros aspetos do padrão do tempo e distribuição de parâmetros, incluindo eventos anómalos, raros e extremos.

Segundo a WMO, um evento extremo é a ocorrência de um valor de uma variável climática ou meteorológica acima (ou abaixo) de um limiar perto do topo (ou fundo) do *ranking* dos valores da variável. Em muitos casos o evento meteorológico ou climático com elevado impacto é considerado um evento extremo.

Alguns exemplos de eventos extremos incluem ondas de calor e de frio, inundações, fortes precipitações, secas, tornados e ciclones tropicais. Apesar dos eventos extremos não ocorrerem com muita frequência, eles podem ser prejudiciais para a nossa saúde, causar grandes estragos em infraestruturas, afetar a nossa economia, e podem ainda causar perdas de vida (IPCC, 2012). Por este motivo é necessário que as comunidades de meteorologia melhorem o conhecimento e a caracterização dos eventos extremos no tempo e no espaço, com metodologias consistentes com a sua definição e a computação dos seus limiares (*thresholds*), por forma a que sistemas de monitoração e previsão eficientes destes eventos possam ser implantados de maneira a construir sociedades resilientes que consigam lidar com a variabilidade climática e que se consigam adaptar às alterações climáticas (WMO, 2015).

Este capítulo está dividido em três partes: comparação anual dos eventos extremos dos climas, comparação dos eventos extremos de cada clima divididos por tipos, por estação do ano e por região e por último a comparação dos períodos de retorno dos eventos extremos em cada clima.

6.1 – Comparação anual dos eventos extremos de cada clima

Nesta secção compara-se o clima histórico e futuro para cada cidade, possibilitando a comparação também entre cidades e/ou regiões. O método utilizado para efetuar as comparações entre climas encontra-se referido na secção 4.2.5.

Nos gráficos abaixo encontram-se representadas estas sete diferentes abordagens para a intensidade do vento aos 850hPa e 300 hPa (em m/s), a intensidade do vento de corte para a camada compreendida entre os 0 e os 6 km e ainda para a helicidade para a camada dos 0 aos 3 km.

Nesta secção optou-se por apresentar apenas os gráficos relativos à duração média dos eventos e ao número de eventos por ano. Os restantes gráficos encontram-se em anexo (Figura A5 – A8).

6.1.1 – Intensidade do vento aos 850 hPa

A Figura 14 mostra dois gráficos de comparação entre os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, tendo em conta a duração média dos eventos em horas (à esquerda) e o número de eventos extremos por ano (à direita), para a intensidade do vento aos 850 hPa.

Ao analisar os gráficos conclui-se que a duração média dos eventos extremos diminui em todas as cidades de uma forma idêntica e que a duração total dos eventos por ano diminui

marcadamente. Quanto ao número de eventos, este diminui no futuro marcadamente, mantendo o padrão definido pelo clima histórico. Os máximos, tantos dos valores médios como dos valores máximos dos eventos extremos, aumenta no futuro a norte e diminui a sul. As médias dos valores médios e dos valores máximos aumentam no futuro, mantendo o padrão e gradiente espacial, respetivamente.

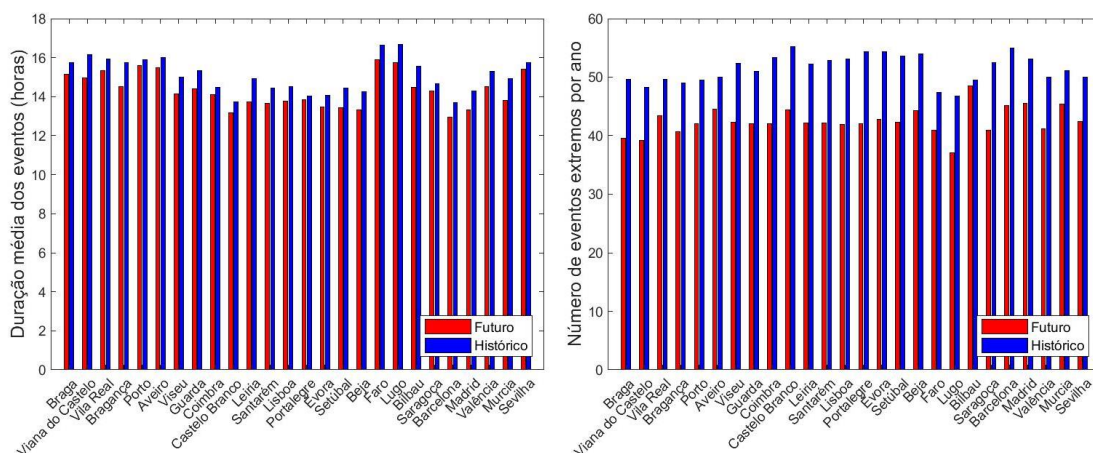


Figura 14 Duração média (horas) dos eventos extremos da intensidade do vento aos 850 hPa (esquerda) e o número de eventos extremos por ano (direita), para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades.

6.1.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa

A Figura 15 representa os gráficos de comparação entre os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, tendo em conta a duração média dos eventos em horas (à esquerda) e o número de eventos extremos por ano (à direita), para a intensidade do vento aos 300 hPa.

Para a intensidade do vento aos 300 hPa encontram-se algumas diferenças relativamente à intensidade do vento aos 850 hPa.

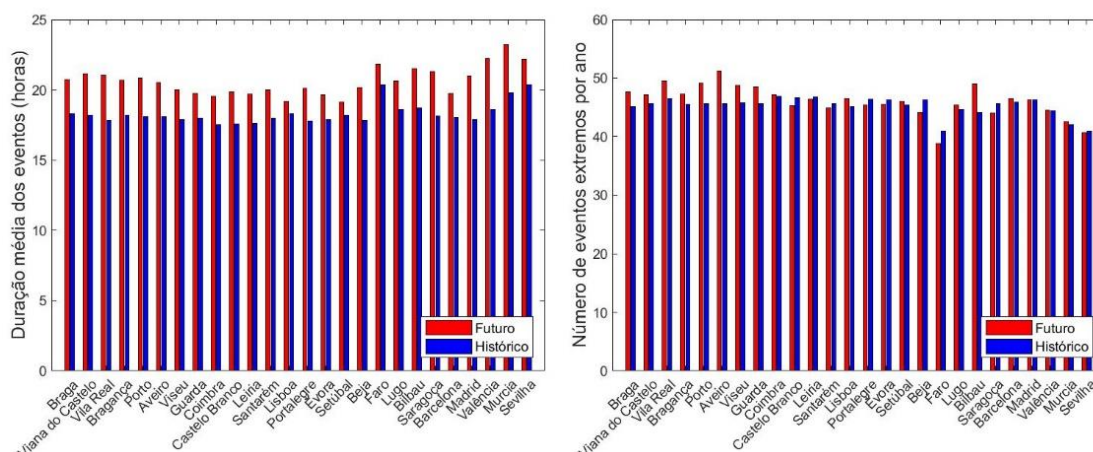


Figura 15 Duração média (horas) dos eventos extremos da intensidade do vento aos 300 hPa (esquerda) e o número de eventos extremos por ano (direita), para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades.

Neste caso, a duração média dos eventos extremos aumenta de forma marcada. A duração total dos eventos por ano aumenta no futuro criando um padrão espacial (inexistente no clima histórico), em que o aumento é mais acentuado a norte e menos acentuado a sul. Já o número de eventos extremos aumenta a norte e diminui a sul.

Quanto aos máximos, o máximo dos valores médios aumenta no futuro, principalmente a norte enquanto que o máximo absoluto, que também aumenta no futuro, intensifica o gradiente verificado no clima histórico. Ambas as médias (dos valores médios e dos valores máximos dos eventos) aumentam no futuro mantendo o padrão espacial evidenciado no clima histórico.

6.1.3 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)

Na Figura 16 observam-se os gráficos de comparação entre os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, tendo em conta a duração média dos eventos em horas (à esquerda) e o número de eventos extremos por ano (à direita), para a intensidade do vento de corte entre os 0 e os 6 km.

Para a intensidade do vento de corte, mais uma vez se verifica que a duração média dos eventos extremos aumenta no futuro, neste caso, principalmente a sul. A duração total dos eventos extremos por ano também aumenta no futuro criando um padrão espacial onde a diferença é menor a norte e maior a sul, ao contrário do que se verificou para a intensidade do vento aos 300 hPa. O número de eventos extremos por ano aumenta no futuro, exceto a sul (Faro, Valencia, Múrcia e Sevilha). O aumento é mais acentuado na região centro/sul de Portugal.

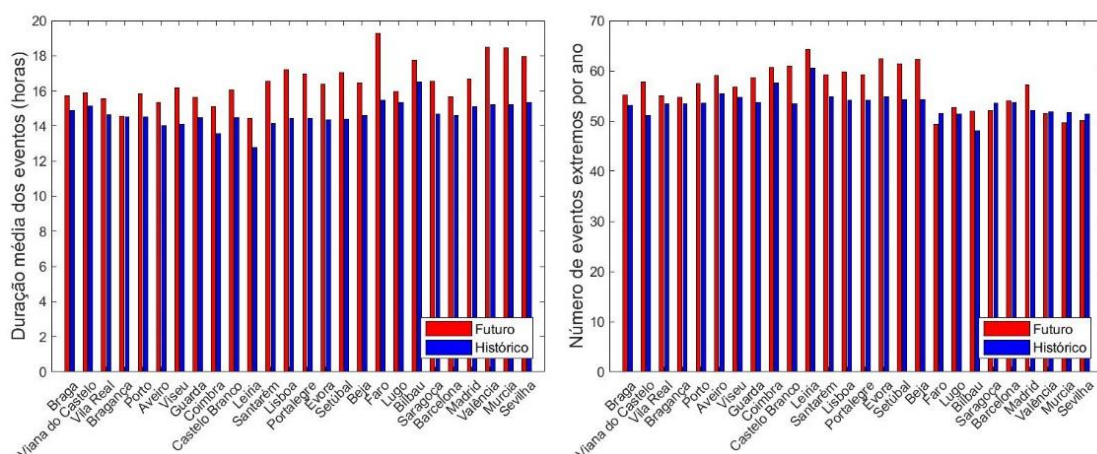


Figura 16 Duração média (horas) dos eventos extremos de intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km (esquerda) e o número de eventos extremos por ano (direita), para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades.

No máximo dos valores médios e dos valores máximos dos eventos extremos não se encontra relação entre as cidades. Verifica-se que em algumas os valores serão maiores, no futuro, enquanto que nas restantes serão menores. Quanto à média dos valores médios e máximos dos eventos, aumenta pouco no futuro.

da diferença é negativa exceto algumas exceções que se verificam principalmente nos tipos 5,8 e 2.

Já para as estações do ano, a que maior número de células indicativas de significância estatística apresenta é a de junho, julho e agosto. Também o conjunto de dados anuais apresenta elevado número de células azuis.

Quanto à região, a que se destaca é a região 4, se tivermos apenas em conta os dados das estações do ano, e as regiões 2 e 3 tendo em conta os dados por estação e anuais. A região 1 (representativa da totalidade da área de estudo) é a que apresenta maior número de células indicativas de significância estatística.

Tabela 8 Número de eventos extremos da intensidade do vento aos 850 hPa para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

	ANUAL			DJF			MAM			JJA			SON		
Região 1	719 -8%	2880 -5%	3091 -20%	310 -3%	1152 7%	1062 -1%	164 7%	703 5%	721 -6%	62 11%	382 -33%	401 -48%	183 -37%	643 -19%	907 -42%
	3484 -17%	7360 -15%	2532 -35%	1033 -11%	1701 -8%	414 -17%	1006 -14%	1972 -6%	673 -26%	739 -24%	2129 -30%	814 -49%	706 -20%	1558 -12%	631 -38%
	3951 -19%	2606 -18%	128 -52%	733 -14%	363 -4%	19 -74%	1022 -17%	597 -7%	20 -20%	1463 -24%	1162 -28%	62 -53%	733 -17%	484 -19%	27 -59%
Região 2	222 0%	1075 5%	1200 -15%	100 18%	498 13%	421 11%	55 4%	259 7%	286 -4%	8 0%	97 -40%	128 -50%	59 -34%	221 4%	365 -43%
	1260 -16%	2814 -16%	919 -41%	373 -6%	656 -9%	127 -22%	363 -3%	768 -2%	247 -27%	256 -36%	840 -41%	306 -58%	268 -30%	550 -8%	239 -43%
	1423 -20%	1043 -25%	30 -30%	224 -21%	126 -21%	1 0%	356 -10%	230 -13%	5 0%	610 -28%	533 -33%	17 -24%	233 -15%	154 -15%	7 -71%
Região 3	318 -13%	1146 -13%	1173 -23%	133 -13%	421 -4%	412 -10%	62 13%	268 -1%	272 -8%	40 18%	191 -25%	157 -32%	83 -48%	266 -32%	332 -48%
	1390 -18%	2893 -17%	988 -34%	393 -13%	622 -11%	168 -17%	422 -24%	791 -18%	265 -28%	310 -18%	850 -22%	303 -44%	265 -15%	630 -12%	252 -39%
	1625 -21%	952 -12%	57 -60%	319 -13%	144 8%	11 -82%	442 -29%	226 0%	9 -22%	561 -25%	381 -21%	23 -61%	303 -15%	201 -20%	14 -64%
Região 4	116 -1%	462 -8%	472 -22%	55 -7%	175 2%	148 1%	27 4%	119 14%	113 -13%	8 13%	65 -49%	70 -66%	26 4%	103 -23%	141 -32%
	564 -16%	1110 -11%	426 -29%	179 -8%	293 -9%	70 -4%	153 -12%	262 20%	113 -24%	116 -38%	295 -38%	143 -43%	116 -11%	260 -16%	100 -31%
	614 -10%	410 -10%	25 -44%	126 1%	63 13%	4 -75%	150 5%	99 2%	4 -25%	193 -17%	164 0	13 -54%	145 -26%	84 -11%	4 0%
Região 5	63 -25%	197 -4%	246 -21%	22 -32%	58 36%	81 -17%	20 5%	57 -2%	50 16%	6 -17%	29 -28%	46 -67%	15 -60%	53 -38%	69 -22%
	270 -11%	543 -2%	199 -24%	88 -30%	130 8%	49 -20%	68 -15%	151 -6%	48 -15%	57 23%	144 6%	62 -34%	57 -14%	118 -19%	40 -23%
	289 -19%	201 -29%	16 -81%	64 -25%	30 -30%	3 -67%	74 -23%	42 -26%	2 -50%	99 -14%	84 -24%	9 -89%	52 -15%	45 -42%	2 -100%

Comparando as células que apresentam valores para a diferença de climas, verificamos que os meses de dezembro até maio apresentam entre 11 a 12 células com valores de diferença positivos, indicando que no futuro o número de eventos extremos será maior que no futuro, no entanto todas as células que marcam uma diferença positiva não estão assinaladas como estatisticamente significativas. A região que maior número de células de diferença positiva é a região 4, mas mais uma vez, resultados mostrados por células não estatisticamente significativas.

Podemos concluir, portanto, que no futuro, espera-se que de uma forma geral os eventos extremos aconteçam em menor quantidade, principalmente os eventos do tipo 6, 7 e 9. Os meses e a região em que se espera uma diferença mais notória são os meses de verão (junho, julho e agosto) e a região 4.

6.2.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa

Numa visão geral do quadro para a intensidade do vento aos 300 hPa (Tabela 9), mais uma vez deparamo-nos com uma maioria de células para as quais temos valores de diferença estatisticamente significativos em tons azuis, mas com 4 casos de tons vermelhos, indicando que para estes 4 casos foram obtidos valores de diferença positivos, significando que no futuro prevê-se um aumento do número de eventos extremos para as regiões, estações e tipos evidenciados por estas células.

Nos casos em que temos células com valores estatisticamente significativos, as diferenças negativas ocorrem principalmente para os tipos 1, 2, 3 e 4 (eventos de curta duração e baixa intensidade), enquanto que para diferenças positivas, o tipo em destaque é o tipo 9 (o mais extremo, elevada duração e intensidade).

Tabela 9 Número de eventos extremos da intensidade do vento aos 300 hPa para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

	ANUAL			DJF			MAM			JJA			SON		
Região 1	662 27%	2353 -1%	2871 42%	275 50%	843 39%	916 61%	140 18%	513 -3%	664 97%	98 -42%	364 -67%	525 -36%	149 37%	633 -13%	766 24%
	3761 -2%	5569 -3%	2433 0%	1052 19%	1310 26%	505 30%	929 6%	1523 9%	635 37%	960 -35%	1500 -39%	730 -38%	820 -1%	1236 -7%	563 -20%
	4146 -9%	1604 -14%	126 -12%	863 11%	300 9%	17 12%	1116 9%	458 -1%	28 -4%	1263 -35%	512 -40%	52 4%	904 -16%	334 -14%	29 -62%
Região 2	277 26%	915 1%	1096 45%	113 52%	327 46%	379 58%	55 5%	208 -3%	228 111%	49 -35%	163 -73%	194 -33%	60 45%	217 -6%	295 29%
	1461 3%	2188 4%	924 6%	383 39%	484 43%	193 35%	322 19%	620 11%	262 34%	422 -34%	615 -36%	259 -32%	334 -8%	469 4%	210 -9%
	1617 -10%	605 -13%	62 -34%	306 19%	89 40%	9 22%	426 9%	161 12%	15 -53%	526 -40%	216 -50%	20 -10%	359 -14%	139 -17%	18 -72%
Região 3	263 30%	917 -10%	1075 33%	129 37%	334 28%	336 51%	56 27%	204 -22%	257 89%	30 -43%	124 -69%	178 -38%	48 60%	255 -22%	304 6%
	1467 -2%	2069 -9%	968 -6%	420 12%	476 21%	204 22%	404 0%	559 2%	240 36%	349 -36%	553 -42%	304 -41%	294 16%	481 -12%	220 -28%
	1609 -9%	599 -14%	43 33%	341 10%	132 -19%	5 40%	449 2%	165 0%	10 60%	473 -31%	177 -27%	23 30%	346 -14%	125 -8%	5 -20%
Região 4	91 21%	333 20%	487 47%	27 85%	107 62%	138 80%	21 29%	61 52%	132 76%	16 -63%	57 -51%	98 -42%	27 0%	108 -4%	119 51%
	607 -14%	850 -6%	364 3%	187 -5%	221 13%	75 55%	146 -3%	219 17%	91 27%	141 -40%	228 -39%	112 -41%	133 -10%	182 -18%	86 -12%
	631 -8%	265 -20%	13 -38%	147 -7%	59 19%	2 -100%	165 33%	79 -18%	1 100%	187 -35%	78 0	6 -33%	132 -23%	49 -22%	4 -50%
Região 5	91 21%	333 20%	487 47%	27 85%	107 62%	138 80%	21 29%	61 52%	132 76%	16 -63%	57 -51%	98 -42%	27 0%	108 -4%	119 51%
	607 -14%	850 -6%	364 3%	187 -5%	221 13%	75 55%	146 -3%	219 17%	91 27%	141 -40%	228 -39%	112 -41%	133 -10%	182 -18%	86 -12%
	631 -8%	265 -20%	13 -38%	147 -7%	59 19%	2 -100%	165 33%	79 -18%	1 100%	187 -35%	78 -48%	6 -33%	132 -23%	49 -22%	4 -50%

Para as estações do ano, a que maior número de células indicativas de significância estatística apresenta é a de junho, julho e agosto. Neste caso, o conjunto de dados anuais não reflete o que acontece neste conjunto de meses, mas sim nos meses entre dezembro e maio, onde a diferença entre clima histórico e futuro é positiva.

Quanto às regiões, não se encontra uma região que se destaque relativamente ao número de células indicativas de significância estatística positiva.

Quando comparamos as células de valores de diferença positiva com as células de valores de diferença negativa verificamos que para os meses entre dezembro e maio os valores são maioritariamente positivos, contudo apenas 4 células foram identificadas como estatisticamente significativas. Já as células de diferença negativa estão presentes maioritariamente nos meses entre junho e novembro, sendo que a maioria das células para os meses de junho, julho e agosto apresentam-se como estatisticamente significativas.

Podemos concluir, portanto, que no futuro, espera-se que de uma forma geral os eventos extremos aconteçam em menor quantidade para os meses de junho, julho e agosto, para os eventos do tipo 1, 2, 3, 4 e 8 em maior quantidade para os meses de dezembro a maio, principalmente os eventos do tipo 9. Os meses em que se espera uma diferença mais notória são os meses de verão (junho, julho e agosto). Uma vez que a corrente de jato se localiza próxima desta altitude, podemos deduzir que este aumento de intensidade do vento para o tipo 9 se deva a uma deslocação da mesma.

6.2.3 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)

No quadro da intensidade do vento de corte (Tabela 10) encontramos uma distribuição de cores muito bem definida, em que cerca de metade das cores é vermelha e a outra metade azul, indicando que existe um balanço entre diferenças positivas e negativas para valores estatisticamente significativos.

Tabela 10 Número de eventos extremos da intensidade do vento de corte entre os 0 e 6 km para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

	ANUAL			DJF			MAM			JJA			SON		
Região 1	840 -2%	3073 -2%	3050 38%	445 -2%	1267 6%	884 71%	188 13%	757 19%	893 64%	54 -30%	311 -44%	526 -20%	153 -8%	738 -17%	747 11%
	3696 -6%	7446 -1%	2779 21%	1166 6%	1868 22%	516 45%	889 10%	1936 12%	709 49%	742 -29%	1865 -24%	884 6%	899 -17%	1777 -15%	670 -5%
	3997 3%	2774 3%	183 5%	844 19%	480 23%	18 33%	937 20%	626 25%	31 58%	1255 -8%	1033 -10%	92 -12%	961 -14%	635 -13%	42 -10%
Região 2	324 16%	1155 0%	1210 30%	165 30%	484 8%	343 65%	72 26%	291 20%	365 48%	23 -57%	111 -45%	200 -28%	64 -6%	269 -16%	302 5%
	1457 0%	2869 0%	1048 14%	467 11%	675 30%	208 26%	316 26%	725 15%	257 36%	302 -26%	790 -28%	330 0%	372 -15%	679 -12%	253 2%
	1575 1%	1043 1%	67 4%	344 13%	194 5%	6 50%	366 15%	247 16%	12 33%	515 -13%	387 -12%	31 -3%	350 -4%	215 3%	18 -17%
Região 3	331 -8%	1291 -3%	1096 49%	205 -22%	555 3%	337 83%	72 3%	291 24%	337 63%	12 75%	117 -38%	160 6%	42 17%	328 -25%	262 14%
	1433 -7%	2866 0%	1138 29%	420 9%	695 19%	198 52%	386 -7%	781 12%	285 64%	285 -22%	678 -15%	383 16%	342 -15%	712 -17%	272 -4%
	1554 7%	1082 8%	80 4%	294 30%	167 31%	9 0%	376 22%	231 44%	11 73%	521 -3%	419 -3%	44 -11%	363 -10%	265 -22%	16 0%
Região 4	127 -15%	431 2%	480 35%	44 11%	150 10%	130 55%	30 -7%	118 17%	125 86%	15 -60%	62 -56%	105 -35%	38 -34%	101 7%	120 20%
	535 -10%	1153 -4%	386 19%	188 -6%	323 21%	71 63%	123 20%	290 11%	106 49%	97 -42%	280 -35%	121 -8%	127 -20%	260 -16%	88 -14%
	556 3%	451 2%	29 -3%	138 12%	82 39%	3 0%	133 28%	107 11%	7 43%	137 4%	160 -19%	15 -33%	148 -30%	102 -5%	4 25%
Região 5	58 -33%	196 -10%	264 41%	31 -58%	78 5%	74 72%	14 36%	57 -11%	66 109%	4 -75%	21 -38%	61 -38%	9 -33%	40 -25%	63 8%
	271 -18%	558 -11%	207 17%	91 -9%	175 0%	39 79%	64 13%	140 -3%	61 28%	58 -55%	117 -29%	50 10%	58 -31%	126 -20%	57 -32%
	312 -8%	198 -9%	7 57%	68 15%	37 41%	0 Inf	62 27%	41 12%	1 300%	82 -23%	67 -18%	2 0%	100 -33%	53 -49%	4 -50%

Tendo em conta apenas os valores estatisticamente significativos, verifica-se que o quadro se encontra dividido a meio, onde os meses entre dezembro e maio adquirem classificações positivas e os restantes meses, valores negativos. A visão anual deste quadro adquire também algumas células de classificação positiva. Os meses que apresentam mais células de valores positivos estatisticamente significativos são os meses de dezembro a fevereiro e os meses que apresentam mais valores negativos também estatisticamente significativos são os meses de junho a agosto.

Ainda para os valores estatisticamente significativos, os valores de diferenças positivas encontram-se maioritariamente relacionados com os tipos 9 e 7. Já os valores de diferenças negativas estão relacionados com os tipos 3, 4 e 8. Relativamente às regiões, não se verifica uma diferença notória entre elas.

De uma forma resumida conclui-se que o número de eventos aumentará nos meses de dezembro a maio (principalmente para eventos do tipo 9 e 7) e diminuirá nos meses de junho a novembro (principalmente para os eventos do tipo 3, 4 e 8).

6.2.4 – Helicidade (0-3 km)

Para a helicidade encontramos um quadro (Tabela 11) repleto de células com valores estatisticamente significativos, o que nos permitirá retirar algumas conclusões a mais do que nos quadros anteriores e verificamos ainda que todas essas células assumem a cor vermelha, concluindo assim que todos esses valores correspondem a diferenças positivas entre o clima histórico e futuro, evidenciando desde já um aumento no número de eventos extremos para esta variável.

Podemos começar por evidenciar que é na região 1 (área total) e na coluna para dados anuais que se encontra maior quantidade de células preenchidas. Podemos concluir a partir daqui, que de uma forma geral, existirá um aumento em todos os tipos de evento. Na matriz correspondente aos dados anuais da região 1, verificamos ainda que o tipo de evento que aumentara mais em número de ocorrências será o tipo 9. Na divisão por estações do ano para a mesma região, observamos também que os eventos do tipo 9 apresentam uma maior percentagem.

Analisando os dados por região, verificamos que a região com maior número de casas preenchidas a vermelho é a região 3. E analisando os dados por estação do ano, a estação que mais casas preenchidas apresenta é a estação de junho a agosto.

No caso da estação entre junho e agosto podemos observar que de uma forma geral, todos os tipos de evento apresentam valores de significância estatística positiva e podemos dar realce aos eventos do tipo 9 que se encontram marcados em todas as regiões para estação, confirmando a afirmação de que este evento (o mais extremo) sofrerá definitivamente um aumento no futuro, em qualquer região analisada. Ainda para a mesma estação, verificamos que os tipos que apresentam valores mais elevados em termos de percentagem, são os tipos 7, 9 e 6.

Verificam-se ainda alguns valores de diferença negativos, mas nenhum deles estatisticamente significativo.

Concluimos assim que para a helicidade, no futuro ocorrerá maior número de eventos de todos os tipos, mas com mais ênfase para os eventos de elevada intensidade e longa duração, com maior relevância para os meses de verão e para a região 3 (a sudoeste) e 1 (área total).

Tabela 11 Número de eventos extremos da helicidade entre os 0 e 3 km para cada tipo de evento extremo, região e estação do ano. Para o clima histórico (1ª linha da célula) e a diferença entre o futuro e histórico (2ª linha da célula). Valores a sombreado indicam diferenças significativas (t-student 5%) positivas (laranja) e negativas (azul).

	ANUAL			DJF			MAM			JJA			SON		
Região 1	2809 10%	3027 29%	2708 40%	855 2%	823 10%	884 32%	672 20%	702 40%	609 56%	694 36%	869 58%	439 108%	588 -18%	633 1%	776 -4%
	7996 13%	6199 22%	2886 32%	1773 0%	1316 0%	753 20%	2072 15%	1539 25%	680 36%	2431 24%	1939 38%	635 73%	1720 8%	1405 20%	818 9%
	6064 18%	2089 27%	386 33%	1129 7%	404 14%	88 0%	1638 16%	509 30%	73 44%	1834 24%	654 29%	96 71%	1463 20%	522 32%	129 22%
Região 2	1035 4%	1086 7%	1128 16%	394 2%	414 -3%	442 23%	235 9%	249 9%	242 24%	175 42%	195 44%	104 84%	231 -27%	228 -9%	340 -20%
	3141 10%	2223 16%	1130 22%	679 2%	444 2%	247 15%	788 14%	594 3%	290 11%	988 20%	681 45%	270 75%	686 -2%	504 4%	323 -7%
	2333 15%	772 14%	141 38%	365 -8%	103 -7%	22 -27%	619 14%	194 4%	28 46%	813 31%	304 21%	48 96%	536 10%	171 26%	43 2%
Região 3	1108 16%	1290 52%	933 79%	233 -9%	188 48%	217 88%	272 22%	294 64%	224 92%	389 42%	548 65%	241 115%	214 -11%	260 11%	251 24%
	2958 20%	2620 31%	1084 47%	651 0%	587 2%	352 33%	776 21%	612 48%	254 47%	922 33%	851 32%	185 101%	609 22%	570 42%	293 31%
	2334 24%	847 41%	150 42%	508 24%	230 26%	48 17%	651 16%	192 62%	30 33%	565 30%	183 43%	16 150%	610 25%	242 38%	56 38%
Região 4	426 11%	498 19%	379 24%	153 26%	171 1%	140 1%	98 37%	124 44%	82 54%	77 -5%	95 47%	42 152%	98 -26%	108 -6%	115 -17%
	1206 9%	1047 15%	352 22%	277 2%	225 -13%	84 0%	325 12%	263 16%	76 47%	341 14%	318 41%	80 54%	263 8%	241 5%	112 -2%
	907 14%	349 22%	46 -28%	147 -1%	47 23%	10 -70%	231 32%	92 15%	7 14%	320 10%	126 27%	13 -8%	209 11%	84 20%	16 -38%
Região 5	240 10%	153 26%	268 25%	75 -16%	50 0%	85 -13%	67 27%	35 46%	61 57%	53 26%	31 65%	52 92%	45 11%	37 11%	70 -6%
	691 5%	309 20%	320 27%	166 -7%	60 17%	70 -4%	183 3%	70 39%	60 93%	180 18%	89 21%	100 29%	162 6%	90 7%	90 4%
	490 9%	121 25%	49 49%	109 -15%	24 -25%	8 63%	137 -4%	31 39%	8 100%	136 -1%	41 24%	19 -5%	108 61%	25 56%	14 86%

6.3 – Comparação dos períodos de retorno dos eventos extremos em ambos os climas

A probabilidade de ocorrência de um evento extremo é frequentemente descrita pelo seu período de retorno, intervalo médio esperado um evento do mesmo tipo e a sua recorrência. De uma maneira mais formal, estes intervalos são inversamente proporcionais à probabilidade de excedência anual, a possibilidade de que um evento que exceda uma determinada magnitude ocorra em qualquer ano. Por exemplo, uma cheia com período de retorno de 100 anos tem 1% de probabilidade de ocorrer a cada ano (o que se traduz em 37% de hipótese de se passar um século sem que ocorra esse evento ($(1-0.01)100 = 37\%$))(IPCC, 2012).

Neste trabalho foram escolhidas duas abordagens diferentes para analisar os períodos de retorno: a duração dos eventos e o número de eventos por ano. Os métodos estatísticos utilizados para fazer o cálculo dos períodos de retorno encontram-se descritos na secção 4.2.7.

Embora anteriormente a referência temporal tenha sido em horas, no caso dos eventos extremos considera-se pertinente uma abordagem em dias, um a vez que os eventos considerados têm uma duração maior e uma abordagem em horas iria dificultar a interpretação dos dados.

Nesta secção optou-se por apresentar apenas os gráficos relativos à cidade de Vila Real, uma vez que esta cidade nunca apresentou exceções em cada uma das quatro variáveis. Os gráficos relativos às restantes cidades encontram-se em anexo, nas Figuras A9 – A12.

6.3.1 – Intensidade do vento aos 850 hPa

A Figura 18 representa dois graficos para o periodo de retorno de eventos extremos na cidade de Vila Real, para os climas histórico e futuro, considerando o número de eventos por ano e a duração dos eventos, para a intensidade do vento aos 850 hPa.

De uma forma geral, em todas as cidades observa-se um aumento dos períodos de retorno quer para a duração dos eventos, quer para o número de eventos por ano. Encontra-se a exceção da cidade de Bilbao onde se verifica que para valores superiores a aproximadamente 50 eventos extremos por ano, o período de retorno de eventos extremos diminui no futuro, indicando uma maior probabilidade e frequência de ocorrerem.

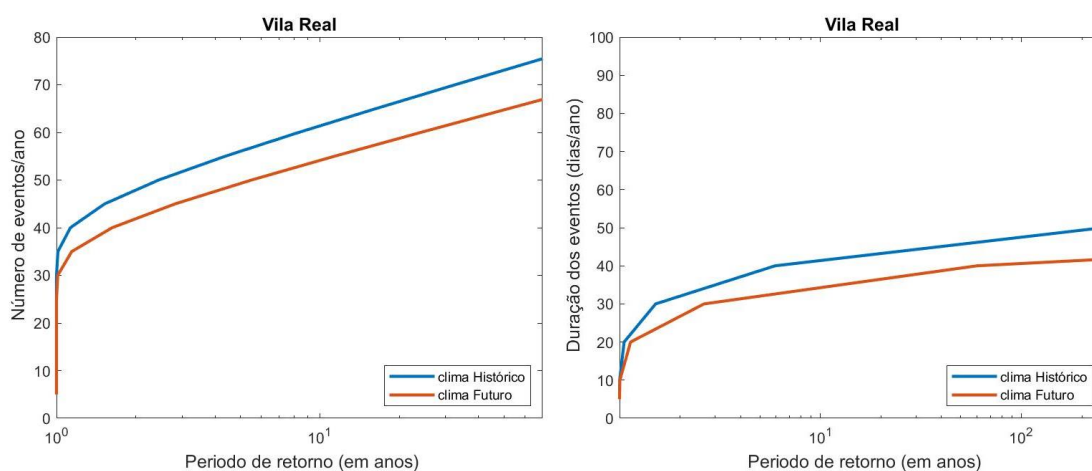


Figura 18 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a intensidade do vento aos 850 hPa.

6.3.2 – Intensidade do vento aos 300 hPa

A Figura 19 representa dois graficos para o periodo de retorno de eventos extremos na cidade de Vila Real, para os climas histórico e futuro, tendo em conta o numero de eventos por ano e a duração dos eventos, para a intensidade do vento aos 300 hPa.

Neste caso a previsão inverte, sendo que se observa uma diminuição nos períodos de retorno dos eventos extremos na maioria das cidades. Encontram-se algumas exceções. Para a duração dos eventos, espera-se que o período de retorno aumente para valores acima dos 40 dias em Faro, 45 dias em Beja, 50 dias em Évora e 55 dias em Sevilha. Já para o caso do número de eventos por ano, espera-se que o período de retorno dos eventos aumente para eventos que ocorram menos de 50 vezes por ano em Faro e Saragoça, e menos de 40 vezes por ano em Barcelona. Espera-se também um aumento do período de retorno de eventos que ocorram mais do que 40 vezes por ano para as cidades de Castelo Branco, Portalegre, Santarém e Sevilha, mais do que 45 vezes para Leiria, Coimbra, Madrid e Múrcia, mais de 50 vezes por ano em Valência, mais que 60 vezes por ano em Viseu e 65 vezes na Guarda. Nos casos de Beja e Évora, o período

de retorno de eventos para o número de eventos por ano, irá aumentar para toda a gama de valores considerados.

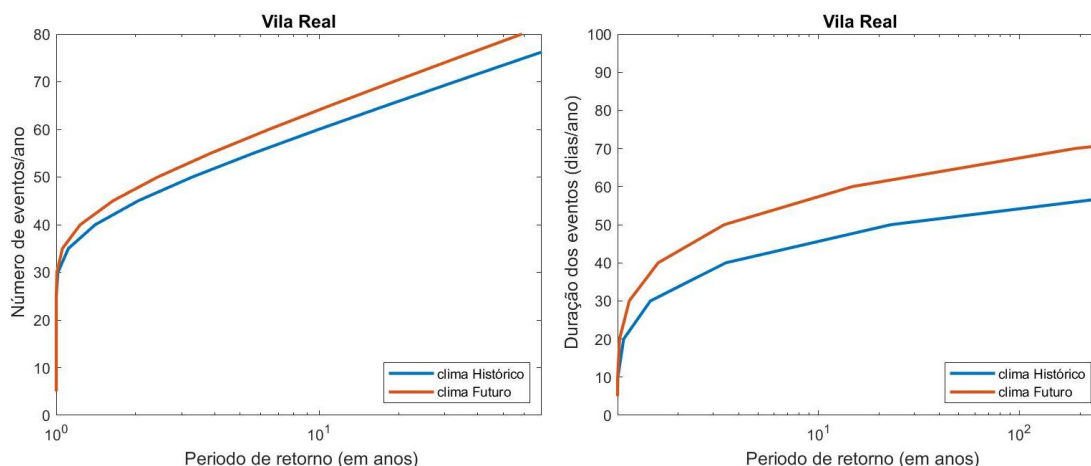


Figura 19 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a intensidade do vento aos 300 hPa.

6.3.3 – Intensidade do vento de corte (0-6 km)

A Figura 20 representa dois graficos para o período de retorno de eventos extremos na cidade de Vila Real, para os climas histórico e futuro, tendo em conta o numero de eventos por ano e a duração dos eventos, para a intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km.

À semelhança do que acontece para a intensidade do vento aos 300 hPa, para a intensidade do vento de corte observa-se eu de uma forma geral, o período de retorno, para ambas as abordagens, tenderá a diminuir. Mais uma vez encontram-se algumas exceções. Em Bilbao e Braga verifica-se um aumento do período de retorno para eventos que ocorram mais do que 65 vezes por ano e ainda para eventos com duração superior a 20 dias. Nas cidades de Aveiro e Múrcia o período de retorno aumenta para eventos que ocorrem acima de 90 vezes por ano, e em Bragança para eventos que ocorrem acima das 85 vezes por ano.

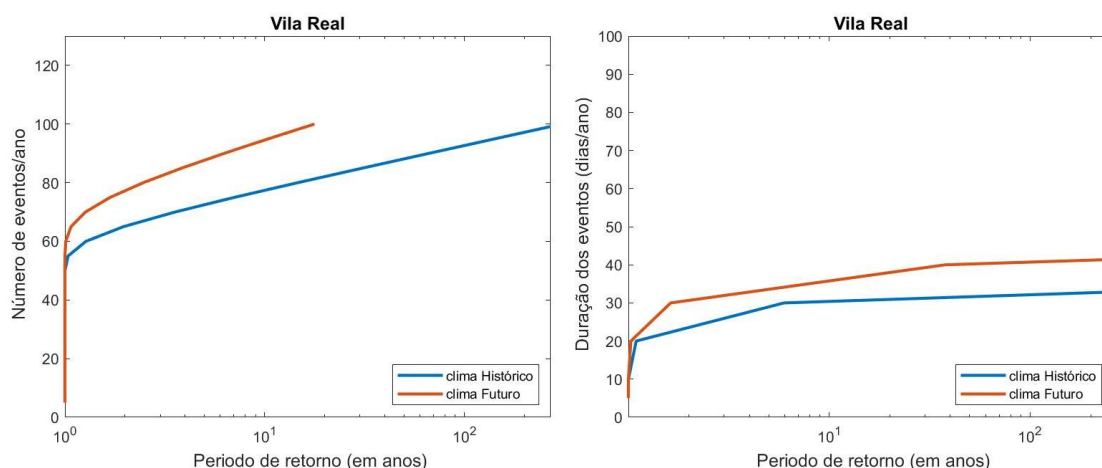


Figura 20 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km.

6.3.4 – Helicidade (0-3 km)

A Figura 21 representa dois graficos para o periodo de retorno de eventos extremos na cidade de Vila Real, para os climas histórico e futuro, tendo em conta o numero de eventos por ano e a duração dos eventos, para a helicidade dos 0 aos 3 km.

Para a helicidade, na maioria dos casos, mais uma vez se observa uma diminuição do período de retorno dos eventos extremos. Novamente foram encontradas algumas exceções. O período de retorno tenderá a aumentar para eventos que durem mais de 55 dias em Faro, mais de 50 dias em Sevilha e menos de 30 dias no Lugo e Saragoça. Quanto ao número de eventos por ano, espera-se que o período de retorno de eventos extremos para eventos que ocorram abaixo das 45 vezes por ano para Viana do Castelo, abaixo das 50 vezes por ano para Barcelona, Bragança, Lugo, Valência e Viseu, abaixo das 55 vezes em Saragoça e abaixo das 65 vezes em Múrcia. Em Faro e Sevilha observou-se que para toda a gama de valores considerada, o período de retorno de eventos extremos tendo em conta o número de ocorrências por ano, aumentará no futuro.

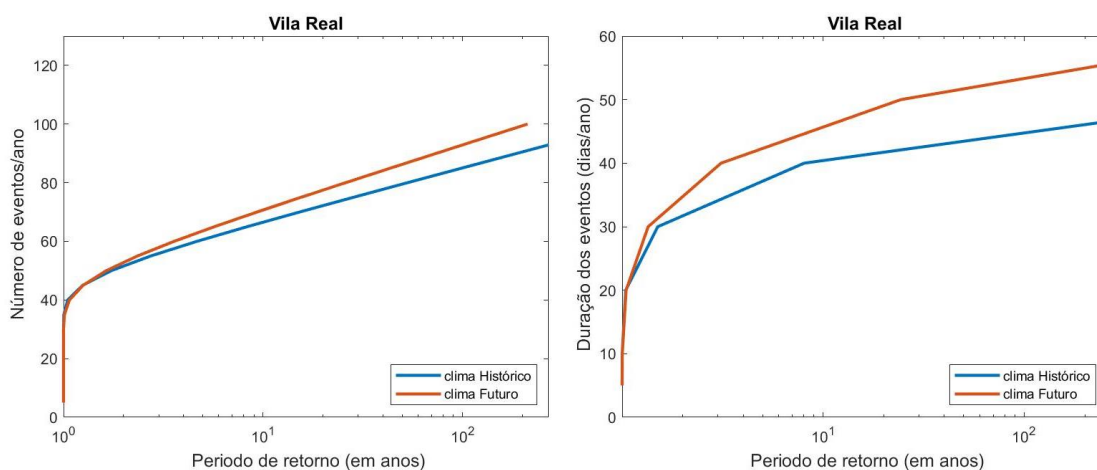


Figura 21 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para a cidade de Vila Real, para a helicidade dos 0 aos 3 km.

Capítulo 7 | Conclusões e discussão

De uma forma geral a intensidade do vento média à superfície diminui para todos os meses, exceto junho, julho e setembro, em que aumenta. Em termos regionais, conclui-se que em toda a Espanha a intensidade do vento média também diminuirá à exceção do Lugo, e em Portugal encontra-se uma divisão entre cidades a norte e a sul de Santarém, em que as cidades a norte de Santarém (inclusive) e Faro apresentam valores menores de intensidade do vento à superfície para o futuro, enquanto que as cidades a sul evidenciam um aumento desta variável, em média. Na maioria das cidades e dos meses verifica-se que no futuro, os 3 percentis (25, 50 e 75) apresentarão valores inferiores ao passado. Encontrou-se uma diminuição na frequência do vento de E, SE, N e NE principalmente nos meses de verão, enquanto que a frequência do vento vindo das restantes direções deverá aumentar durante todo o ano. Os ventos mais intensos são nos meses de inverno, o que se manterá, bem como as direções correspondentes. Verificou-se ainda que em termos de direção, as direções predominantes manter-se-ão e na maior parte dos casos, ocorrerão mais frequentemente.

Relativamente à intensidade do vento aos 850 hPa conclui-se que, de uma forma geral, a intensidade do vento diminuirá no futuro sem grande distinção entre cidades no verão, outono e ano. Diferenças entre a intensidade do vento à superfície e a 850 representam, em grande medida, os efeitos da camada limite na atmosfera. Pode afirmar-se que os 850 hPa representam a base da atmosfera livre. Espera-se uma diminuição na duração média dos eventos bem como na duração total dos eventos por ano. Também se espera uma diminuição no número de eventos. Já os máximos dos valores médios e os máximos absolutos aumentam a norte e diminuem a sul. As médias dos valores médios e dos valores máximos deverão aumentar. No futuro, espera-se que de uma forma geral os eventos extremos aconteçam em menor quantidade, principalmente os eventos do tipo 6, 7 e 9. Os meses e a região em que se espera uma diferença mais notória são os meses de verão (junho, julho e agosto) e a região 4. Relativamente aos períodos de retorno, espera-se que estes aumentem, quer para duração dos eventos, quer para o número de eventos por ano. Encontra-se a exceção da cidade de Bilbao onde se verifica que para valores superiores a aproximadamente 50 eventos extremos por ano, o período de retorno de eventos extremos diminui no futuro, indicando uma maior probabilidade e frequência de ocorrerem.

Conclui-se que a intensidade do vento aos 300 hPa irá diminuir de forma significativa entre junho e outubro embora os restantes meses mostrem diferenças positivas, mas não significativas. A duração média dos eventos extremos aumenta de forma marcada bem como a duração total dos eventos por ano, com maior diferença a norte. O número de eventos extremos aumenta a norte e diminui a sul. Os máximos e médias dos valores máximos e médios aumentarão no futuro. Podemos concluir que no futuro, espera-se que de uma forma geral os eventos extremos aconteçam em menor quantidade para os meses entre junho e novembro, para os eventos do tipo 1, 2, 3 e 4 e em maior quantidade para os meses de dezembro a maio, principalmente os eventos do tipo 9. Os meses em que se espera uma diferença mais notória são os meses de verão (junho, julho e agosto). Uma vez que a corrente de jato se localiza próxima desta altitude, podemos deduzir que este aumento de intensidade do vento para o tipo 9 se deva a uma deslocação da mesma. Observa uma diminuição nos períodos de retorno dos eventos extremos na maioria das cidades. Encontram-se algumas exceções. Para a duração dos eventos, espera-se que o período de retorno aumente para valores acima dos 40 dias em Faro, 45 dias em Beja, 50 dias em Évora e 55 dias em Sevilha. Já para o caso do número de eventos por ano, espera-se que o período de retorno dos eventos aumente para eventos que ocorram menos de 50 vezes por ano em Faro e Saragoça, e menos de 40 vezes por ano em Barcelona. Espera-se também um aumento do período de retorno de eventos que ocorram mais do que 40 vezes por ano para as

idades de Castelo Branco, Portalegre, Santarém e Sevilha, mais do que 45 vezes para Leiria, Coimbra, Madrid e Múrcia, mais de 50 vezes por ano em Valência, mais que 60 vezes por ano em Viseu e 65 vezes na Guarda. Nos casos de Beja e Évora, o período de retorno de eventos para o número de eventos por ano, irá aumentar para toda a gama de valores considerados.

De acordo com o relatório do IPCC (Stocker et al. (2013)) o continuo aquecimento global já começa ter as suas consequências na corrente de jato e nos correspondentes padrões meteorológicos. É provável que a circulação se tenha movido em direção ao polo desde os anos de 1970, envolvendo uma expansão meridional da região tropical, um desvio em direção ao polo dos trajetos de tempestade e correntes de jato, e uma contração do vórtice polar do Norte. Estas evidências são mais robustas no Hemisfério Norte. Como o Ártico está a aquecer mais rápido que os trópicos, o gradiente de temperatura entre o equador e o Polo Norte está a diminuir, provocando, de acordo com o equação do vento térmico, um abrandamento na corrente de jato. À medida que a corrente de jato perde intensidade, a sua forma torna-se mais ondulatória, amplificando o jato mais frequentemente, o que aumenta a probabilidade de eventos extremos, conhecida como amplificação do Ártico. Contudo, nem todos os estudos suportam a amplificação do Ártico e os seus impactos nas latitudes médias e nos padrões meteorológicos (Screen & Simmonds, 2013). Na verdade, estes estudos não significam que a pesquisa de Francis & Vavrus (2013) esteja errada, mas sim que a atmosfera é complexa e que é necessário realizar-se mais pesquisas.

O estudo realizado por Woollings and Blackburn (2012) mostra que o modelo climático CMIP3 evidencia uma concordância com o deslocamento em direção ao polo da corrente de jato como resposta a forçamentos antropogénicos. Os padrões NAO e EA podem ser combinados para descrever as alterações climatológicas e interanuais na variabilidade da corrente de jato no Atlântico Norte. A NAO descreve o deslocamento da corrente de jato, enquanto que a NAO e a EA têm igual importância na descrição das mudanças de intensidade da corrente de jato.

Através do uso de simulações de modelos cuidadosamente desenhados com e sem perda de gelo no Ártico, é possível verificar que o aquecimento junto à superfície do Ártico tem impacto na corrente de jato nas latitudes médias (Barnes & Simpson, 2017). Em termos da resposta da corrente de jato, a corrente sobre o Pacífico Norte e o Atlântico Norte muda constantemente de posição deslocando-se em direção a equador em resposta ao aquecimento do Ártico, mas também ganha intensidade em vez de enfraquecer, durante a maioria dos meses. Além disso, a sensibilidade da posição e intensidade da corrente de jato ao aquecimento do Ártico depende fortemente da estação do ano. Especificamente, em ambas as bacias oceânicas, a corrente desloca-se em direção ao equador durante os meses de verão (Barnes & Simpson, 2017).

Posto isto, relativamente à intensidade do vento aos 300 hPa, conclui-se que durante os meses de verão, em que a corrente de jato é mais fraca, a intensidade média do vento diminuirá devido ao aquecimento do artico e por consequencia, tornarse-á mais ondolatória. Nos meses de inverno, em média aumentará pouco, contudo, tendo em conta os eventos extremos, estes aumentarão, em termos de duração e de valores médios e máximos. O numero de eventos extremos aumenta a norte e diminui a sul, indicando que a corrente de jato irá estar mais vezes presente no topo da atmosfera, sob o norte de Portugal, o que poderá resultar também de um enfraquecimento da mesma, uma vez que a sua localização é, normalmente a norte de Portugal.

De uma forma resumida conclui-se que a média da intensidade do vento de corte tenderá a aumentar exceto entre julho e outubro. A conclusão retirada a partir da representação dos hodógrafos é que todos eles apresentam uma estrutura semelhante, com valores a variar entre

os 75° e os 105°, onde o hodógrafo do clima histórico se encontra abaixo do hodógrafo do clima futuro, uma vez que os valores da direção são menores no clima futuro. A duração média dos eventos extremos aumenta no futuro, principalmente a sul. A duração total dos eventos extremos por ano também aumenta no futuro criando um padrão espacial onde a diferença é menor a norte e maior a sul. O número de eventos extremos por ano aumenta no futuro, exceto a sul (Faro, Valencia, Múrcia e Sevilha). O aumento é mais acentuado na região centro/sul de Portugal. No máximo dos valores médios e dos valores máximos dos eventos extremos não se encontra relação entre as cidades. Verifica-se que em algumas os valores serão maiores, no futuro, enquanto que nas restantes serão menores. Quanto à média dos valores médios e máximos dos eventos, aumenta pouco no futuro. Conclui-se ainda que o número de eventos aumentará nos meses de dezembro a maio (principalmente para eventos do tipo 9 e 7) e diminuirá nos meses de junho a novembro (principalmente para os eventos do tipo 3, 4 e 8). Observa-se que de uma forma geral, o período de retorno, para ambas as abordagens, tenderá a diminuir. Mais uma vez encontram-se algumas exceções. Em Bilbao e Braga verifica-se um aumento do período de retorno para eventos que ocorram mais do que 65 vezes por ano e ainda para eventos com duração superior a 20 dias. Nas cidades de Aveiro e Múrcia o período de retorno aumenta para eventos que ocorrem acima de 90 vezes por ano, e em Bragança para eventos que ocorrem acima das 85 vezes por ano.

Conclui-se que o vento de corte aumentará todo o ano exceto nos meses mais quentes e que este aumento será mais notório a sul de Portugal. Entre dezembro e maio, aumentará o vento de corte principalmente os eventos mais extremos do mesmo (longa duração e forte intensidade). Também se espera que os eventos extremos sejam mais recorrentes uma vez que o período de retorno diminuirá. Estes resultados terão certamente impacto na aviação, principalmente na descolagem e na aterragem.

Por último, quanto à helicidade, pode concluir-se que, de uma forma geral, a helicidade tenderá a aumentar, em algumas regiões mais de 200% face ao valor médio do clima histórico. Para algumas cidades haverá diminuição da helicidade, como é o caso Braga, Bragança, Guarda, Coimbra e Bilbao. É de salientar que, embora a Guarda apresente maioritariamente diferenças negativas (não significativas), observam-se diferenças positivas significativas superiores a 200% em julho e agosto. No caso da helicidade, o efeito das alterações climáticas é apresentado da mesma forma na duração média dos eventos, na duração total dos eventos por ano e no número total de eventos por ano, sendo que se verifica um aumento no futuro, intensificando-se o padrão espacial verificado no clima histórico. Os máximos dos valores médios e dos valores máximos dos eventos apresentam um elevado aumento nas cidades mais a norte e em Lisboa e uma considerável diminuição nas cidades na região centro/norte de Portugal. Relativamente à média dos valores médios e máximos dos eventos, verificam-se ligeiras alterações onde algumas cidades apresentam aumentos e outras, diminuição. Concluímos assim que para a helicidade, no futuro ocorrerá maior número de eventos de todos os tipos, mas com mais ênfase para os eventos de elevada intensidade e longa duração, com maior relevância para os meses de verão e para a região 3 (a sudoeste). Na maioria dos casos, mais uma vez se observa uma diminuição do período de retorno dos eventos extremos. Novamente foram encontradas algumas exceções. O período de retorno tenderá a aumentar para eventos que durem mais de 55 dias em Faro, mais de 50 dias em Sevilha e menos de 30 dias no Lugo e Saragoça. Quanto ao número de eventos por ano, espera-se que o período de retorno de eventos extremos para eventos que ocorram abaixo das 45 vezes por ano para Viana do Castelo, abaixo das 50 vezes por ano para Barcelona, Bragança, Lugo, Valência e Viseu, abaixo das 55 vezes em Saragoça e abaixo das 65 vezes em Múrcia. Em Faro e Sevilha observou-se que para toda a gama de valores considerada, o período de retorno de eventos extremos tendo em conta o número de ocorrências por ano, aumentará no futuro.

Referências Bibliográficas

- Amengual, A., Homar, V., Romero, R., Alonso, S., & Ramis, C. (2012a). Projections of the climate potential for tourism at local scales: Application to Platja de Palma, Spain. *International Journal of Climatology*, 32(14), 2095–2107.
- Amengual, A., Homar, V., Romero, R., Alonso, S., & Ramis, C. (2012b). A statistical adjustment of regional climate model outputs to local scales: Application to Platja de Palma, Spain. *Journal of Climate*, 25(3), 939–957.
- Barnes, E. A., & Simpson, I. R. (2017). Seasonal sensitivity of the Northern Hemisphere jet streams to Arctic temperatures on subseasonal time scales. *Journal of Climate*, 30(24), 10117–10137.
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., et al. (2007). Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81(SUPPL. 1), 71–95.
- Bichet, A., Wild, M., Folini, D., & Schr, C. (2012). Causes for decadal variations of wind speed over land: Sensitivity studies with a global climate model. *Geophysical Research Letters*, 39(11), 4–9.
- Bo, J., Terray, L., Habets, F., & Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies Abstract :, 1655(August), 1643–1655.
- Boldingh Debernard, J., & Petter Røed, L. (2008). Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas: A revisit. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 60 A(3), 427–438.
- Brands, S., Herrera, S., Fernández, J., & Gutiérrez, J. M. (2013). How well do CMIP5 Earth System Models simulate present climate conditions in Europe and Africa? *Climate Dynamics*, 41(3–4), 803–817.
- Brands, S., Herrera, S., San-Martín, D., & Gutierrez, J. M. (2011). Validation of the ENSEMBLES global climate models over southwestern Europe using probability density functions, from a downscaling perspective. *Climate Research*, 48(2–3), 145–161.
- Brázdil, R., Chromá, K., Dobrovolny, P., & Tolasz, R. (2009). Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961–2005. *International Journal of Climatology*, 29(3), 223–242. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1861>
- Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Lima, D. C. A., & Miranda, P. M. A. (2019). Mean and extreme temperatures in a warming climate: EURO CORDEX and WRF regional climate high-resolution projections for Portugal. *Climate Dynamics*, 52(1–2), 129–157. Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-018-4124-4>
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Silva Santos, C. (2017). Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. *Renewable Energy*, 101(2017), 29–40.
- Cusack, S. (2013). A 101 year record of windstorms in the Netherlands. *Climatic Change*, 116(3–4), 693–704.
- Dadaser-Celik, F., & Cengiz, E. (2014). Wind speed trends over Turkey from 1975 to 2006. *International Journal of Climatology*, 34(6), 1913–1927.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., et al.

- (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597.
- Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario : Model results and statistical correction according to observed values, 57, 16–26.
- Donat, M. G., Leckebusch, G. C., Wild, S., & Ulbrich, U. (2011). Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(5), 1351–1370.
- Donat, Markus G., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., & Ulbrich, U. (2010a). Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases. *International Journal of Climatology*, 30(9), 1289–1300.
- Donat, Markus G., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., & Ulbrich, U. (2010b). European storminess and associated circulation weather types: Future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research*, 42(1), 27–43.
- Earl, N., Dorling, S., Hewston, R., & Von Glasow, R. (2013). 2010-1980 Variability in U.K. surface wind climate. *Journal of Climate*, 26(4), 1172–1191.
- Francis, J. A., & Vavrus, S. J. (2013). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, 40(17), 4734–4739.
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., et al. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597.
- Holt, E., & Wang, J. (2012). Trends in wind speed at wind turbine height of 80 m over the contiguous United States using the north American Regional Reanalysis (NARR). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(12), 2188–2202.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Research Report*. Retrieved from papers://ef64220a-a077-48ec-ae81-be13b32d2073/Paper/p991
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of working Groups I, II and III to the Fifth Assess. Journal of Crystal Growth* (Vol. 218).
- Irvine, E. A., Shine, K. P., & Stringer, M. A. (2016). What are the implications of climate change for trans-Atlantic aircraft routing and flight time? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 44–53. The Authors. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.04.014>
- Jerez, S., Trigo, R. M., Vicente-Serrano, S. M., Pozo-Vázquez, D., Lorente-Plazas, R., Lorenzo-Lacruz, J., Santos-Alamillos, F., et al. (2013). The impact of the north atlantic oscillation on renewable energy resources in Southwestern Europe. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(10), 2204–2225.
- Marsh, P. T., Brooks, H. E., & Karoly, D. J. (2009). Preliminary investigation into the severe thunderstorm environment of Europe simulated by the Community Climate System Model 3. *Atmospheric Research*, 93(1–3), 607–618. Elsevier B.V. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.014>

- Marta-Almeida, M., Teixeira, J. C., Carvalho, M. J., Melo-Gonçalves, P., & Rocha, A. M. (2016). High resolution WRF climatic simulations for the Iberian Peninsula: Model validation. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94, 94–105.
- McBean, G. (2006). An integrated approach to air pollution, climate and weather hazards. *Policy Options*, 27(8), 18–24. Retrieved from <http://policyoptions.irpp.org/magazines/climate-change/an-integrated-approach-to-air-pollution-climate-and-weather-hazards/>
- McInnes, K. L., Erwin, T. A., & Bathols, J. M. (2011). Global Climate Model projected changes in 10 m wind speed and direction due to anthropogenic climate change. *Atmospheric Science Letters*, 12(4), 325–333.
- McInnes, K. L., Macadam, I., Hubbert, G. D., & O’Grady, J. G. (2009). A modelling approach for estimating the frequency of sea level extremes and the impact of climate change in southeast Australia. *Natural Hazards*, 51(1), 115–137.
- McVicar, T. R., Van Niel, T. G., Li, L. T., Roderick, M. L., Rayner, D. P., Ricciardulli, L., & Donohue, R. J. (2008). Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophysical Research Letters*, 35(20), 1–6.
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carte, T., Edmonds, J., Elgizouli, S., et al. (2007). TOWARDS NEW SCENARIOS FOR ANALYSIS OF EMISSIONS, CLIMATE CHANGE, IMPACTS, AND RESPONSE STRATEGIES, 132.
- Najac, J., Boé, J., & Terray, L. (2009). A multi-model ensemble approach for assessment of climate change impact on surface winds in France. *Climate Dynamics*, 32(5), 615–634.
- Peings, Y., Cattiaux, J., Vavrus, S., & Magnusdottir, G. (2017). Late twenty-first-century changes in the midlatitude atmospheric circulation in the CESM large ensemble. *Journal of Climate*, 30(15), 5943–5960.
- Pereira, C., & Coelho, C. (2013). Mapas de Risco das Zonas Costeiras por Efeito da Ação Energética do Mar. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 13(1), 27–43. Retrieved from <http://www.aprh.pt/rgci/rgci325.html>
- Pereira, S. C., Marta-Almeida, M., Carvalho, A. C., & Rocha, A. (2018). Extreme Precipitation Events under Climate Change in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*.
- Peterson, T. C., Kunkel, K. E., Gutowski, W. J., & Easterling, D. R. (2008). Weather and Climate Extremes in a Changing Climate Regions of Focus : *Science*, (June), 180.
- Pinto, J. G., Fröhlich, E. L., Leckebusch, G. C., & Ulbrich, U. (2007). Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(1), 165–175.
- Pirazzoli, P. A., & Tomasin, A. (2003). Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas. *International Journal of Climatology*, 23(8), 963–973.
- Reichle, R. H., & Koster, R. D. (2004). Bias reduction in short records of satellite soil moisture, 31(July 2003), 2–5.
- Screen, J. A., & Simmonds, I. (2013). Exploring links between Arctic amplification and mid-latitude weather. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 959–964.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(6), 2473–2493.

- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X.-Y., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA*, (June), 113.
- Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Ferreira, J. J., & Miranda, P. M. A. (2015). Climate change and the Portuguese precipitation: ENSEMBLES regional climate models results. *Climate Dynamics*, 45(7–8), 1771–1787. Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-014-2432-x>
- Sterl, A., Van Den Brink, H., De Vries, H., Haarsma, R., & Van Meijgaard, E. (2009). An ensemble study of extreme storm surge related water levels in the North Sea in a changing climate. *Ocean Science*, 5(3), 369–378.
- Stocker, T. F., Dahe, Q., Plattner, G.-K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., Bréon, F.-M., et al. (2013). IPCC Technical Summary AR5. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 33–115.
- Vecchi, G. A., & Soden, B. J. (2007). Increased tropical Atlantic wind shear in model projections of global warming. *Geophysical Research Letters*, 34(8), 1–5.
- Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., et al. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4).
- Viceto, C., Marta-Almeida, M., & Rocha, A. (2017). Future climate change of stability indices for the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4390–4408.
- Wan, H., Wang, X. L., & Swail, V. R. (2010). Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds. *Journal of Climate*, 23(5), 1209–1225.
- WMO. (2015). Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events. *Task Team on the Definition of Extreme Weather and Climate Events*, (December 2015), 62.
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., & Lettenmaier, D. P. (2004). HYDROLOGIC IMPLICATIONS OF DYNAMICAL AND STATISTICAL APPROACHES TO DOWNSCALING CLIMATE MODEL OUTPUTS, 189–216.
- Woollings, T., & Blackburn, M. (2012). The north Atlantic jet stream under climate change and its relation to the NAO and EA patterns. *Journal of Climate*, 25(3), 886–902.

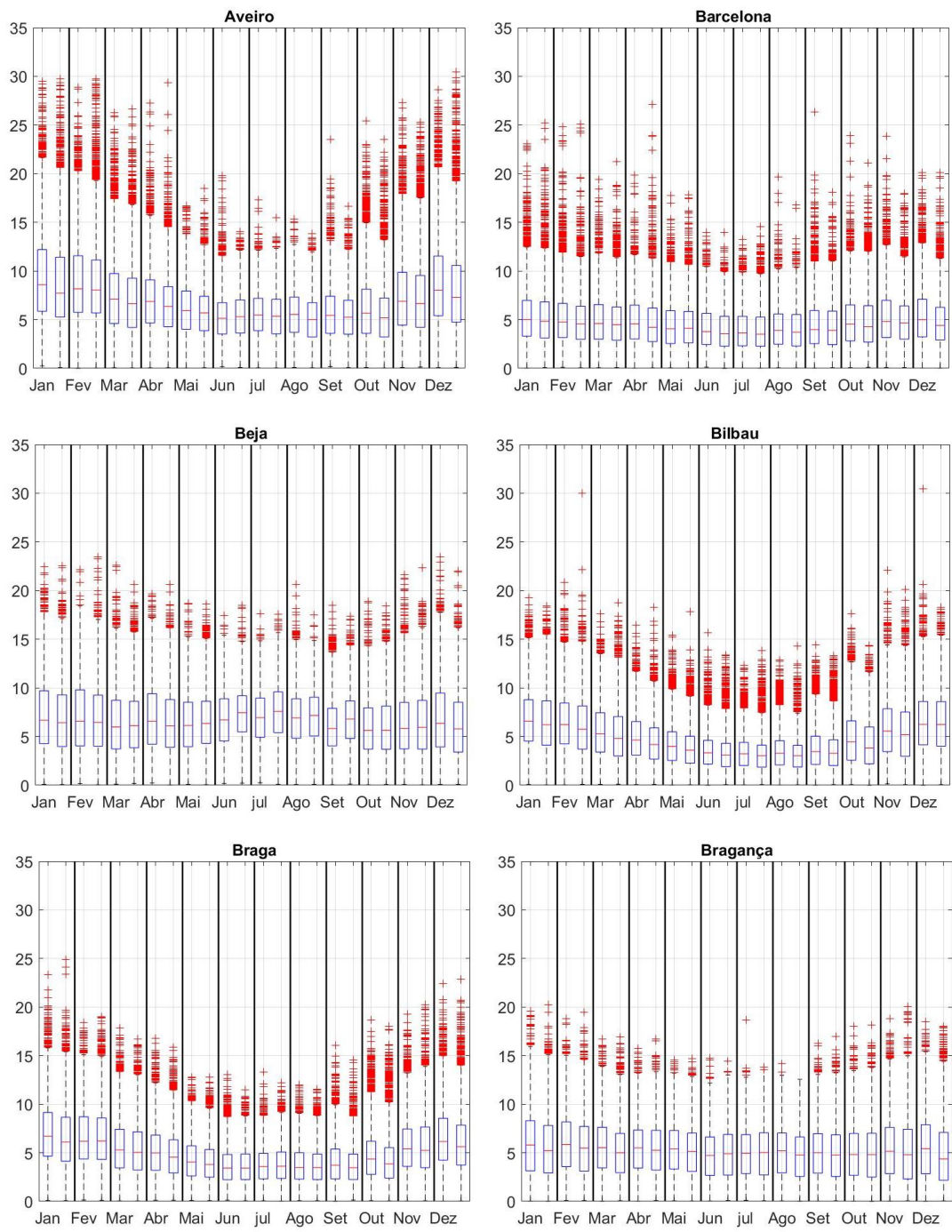
Websites

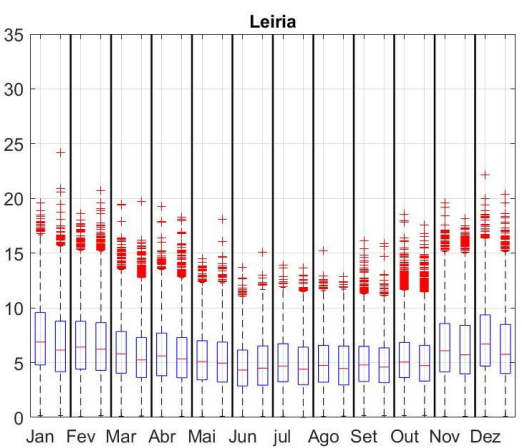
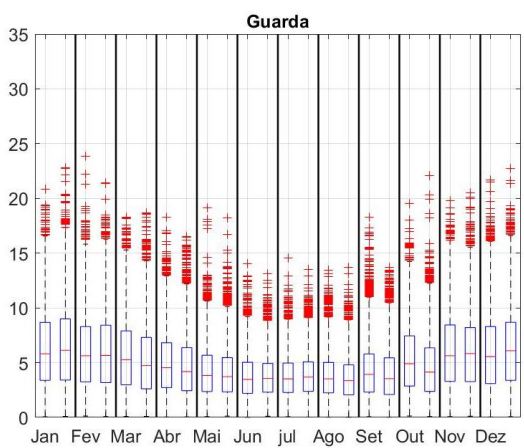
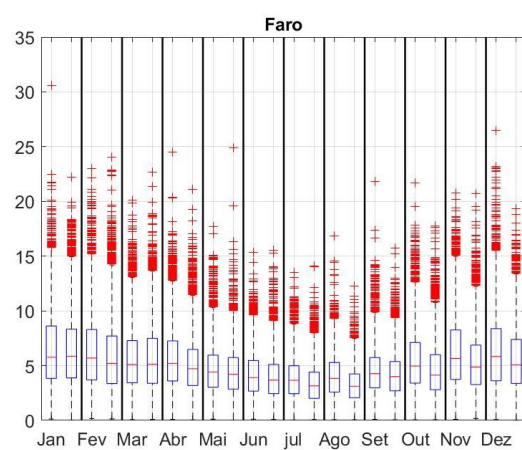
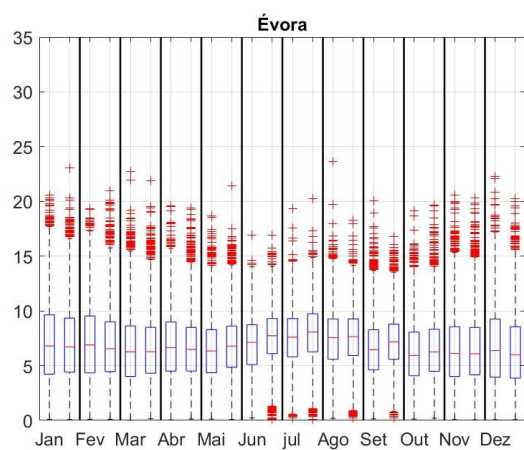
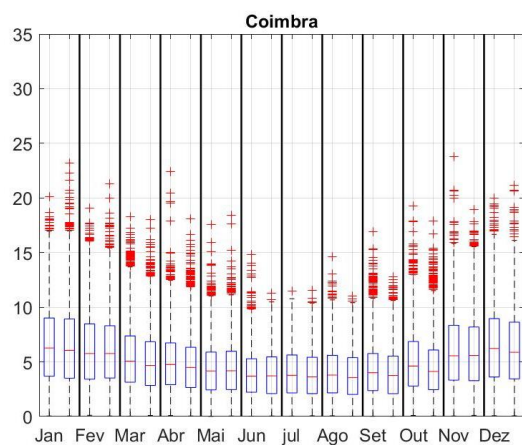
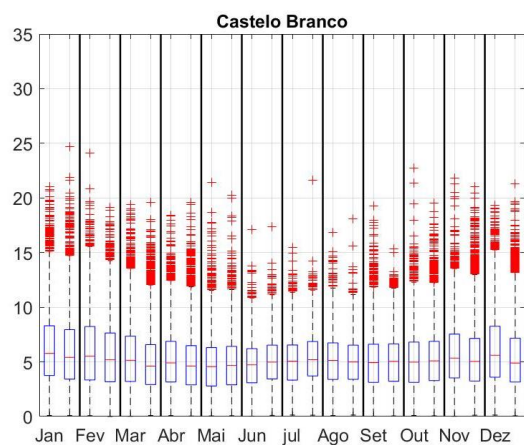
ECMWF. (s.d.). *ECMWF*. Obtido em 05 de 2019, de <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim>

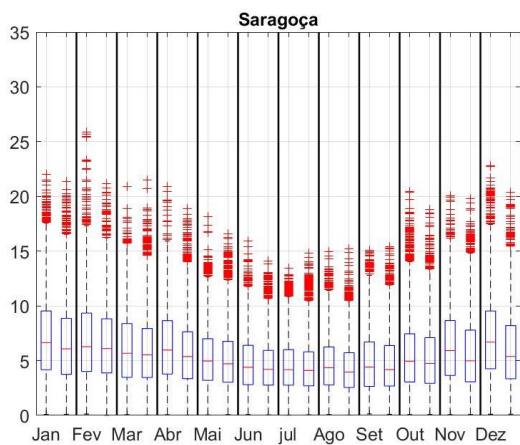
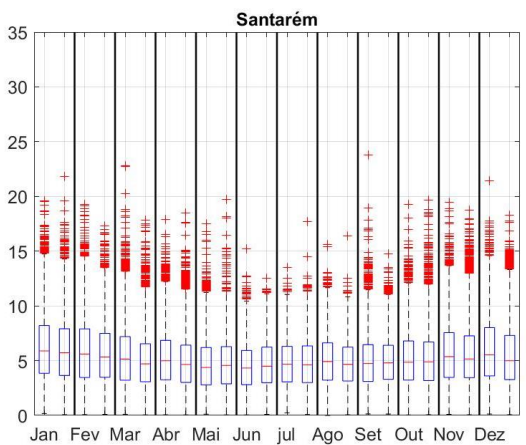
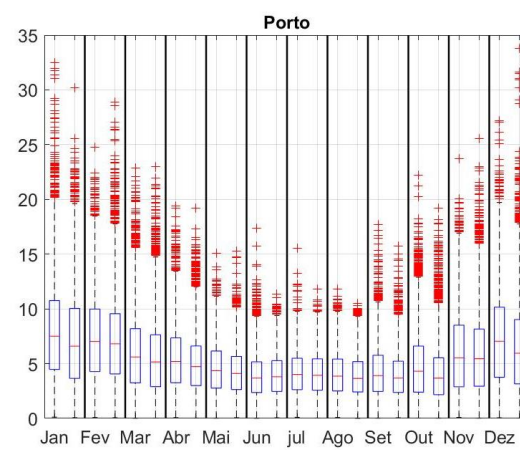
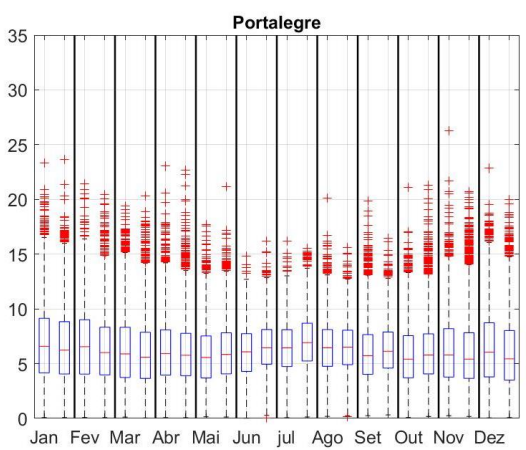
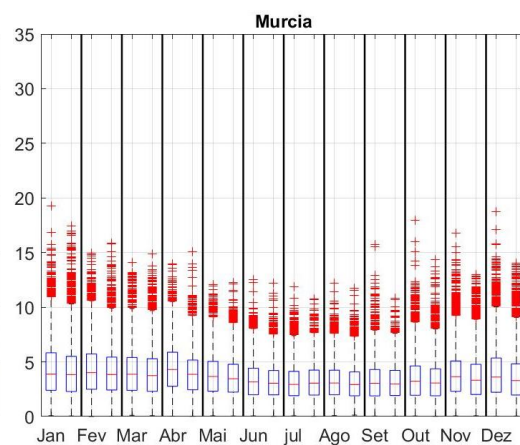
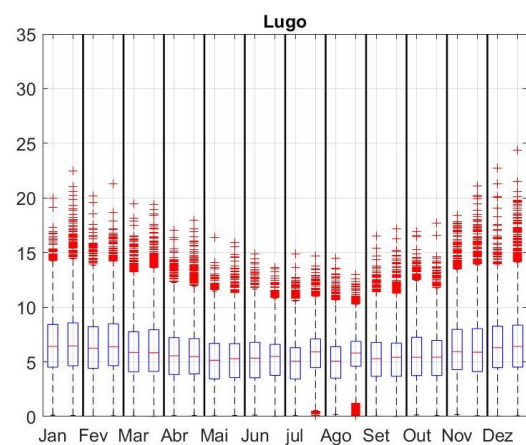
Haby, J. (maio de 2019). *the weather prediction*. Obtido de wind shear: <https://www.theweatherprediction.com/severe/ingredients/windshear/>

Anexos

Figura A1 Gráficos Boxplot para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid) da intensidade do vento à superfície, para cada mês dos climas histórico (boxplot da esquerda para cada mês) e futuro (boxplot da direita para cada mês). É mostrada a mediana ‘-’, intervalo inter-quartil (rectângulo azul) e outliers ‘+’.







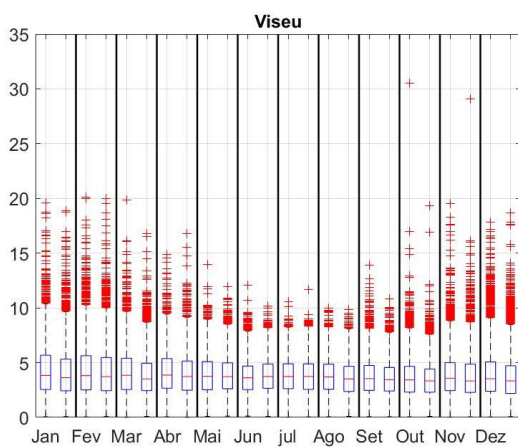
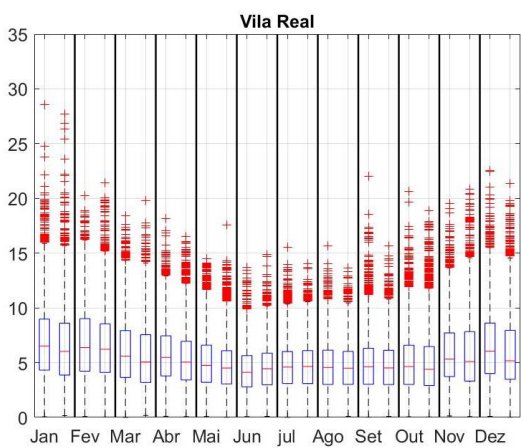
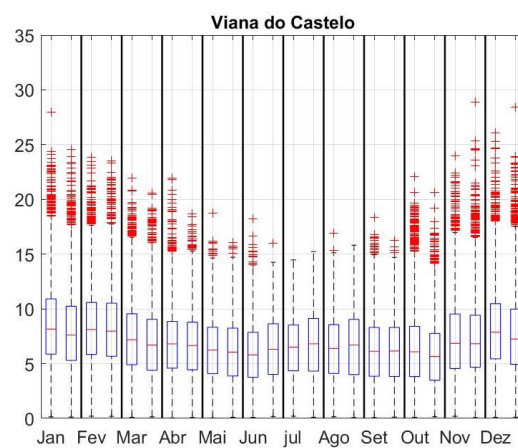
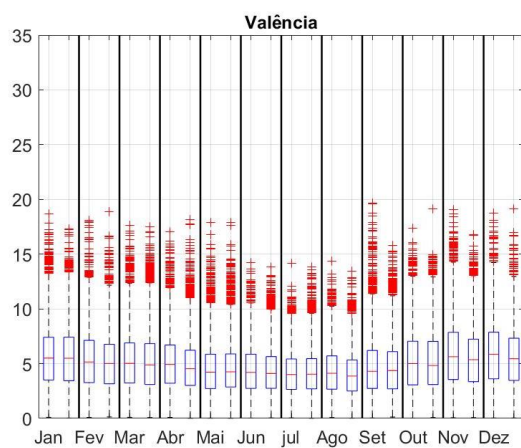
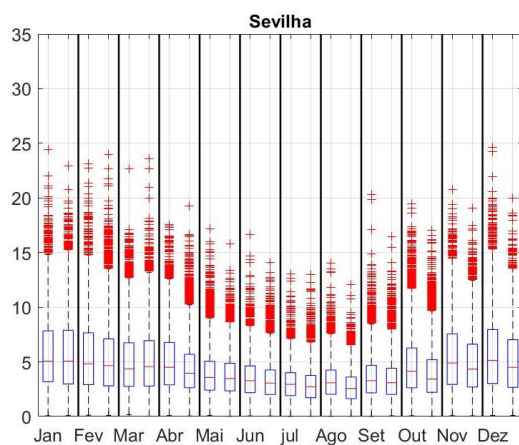
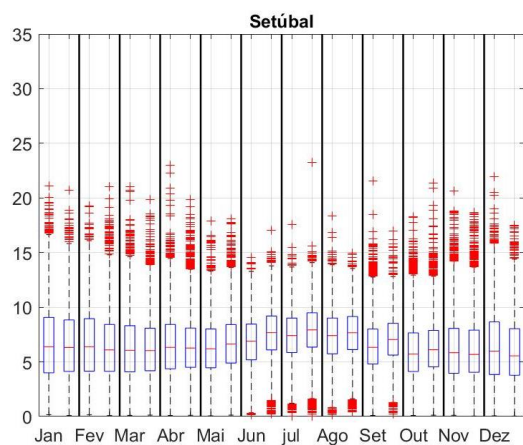
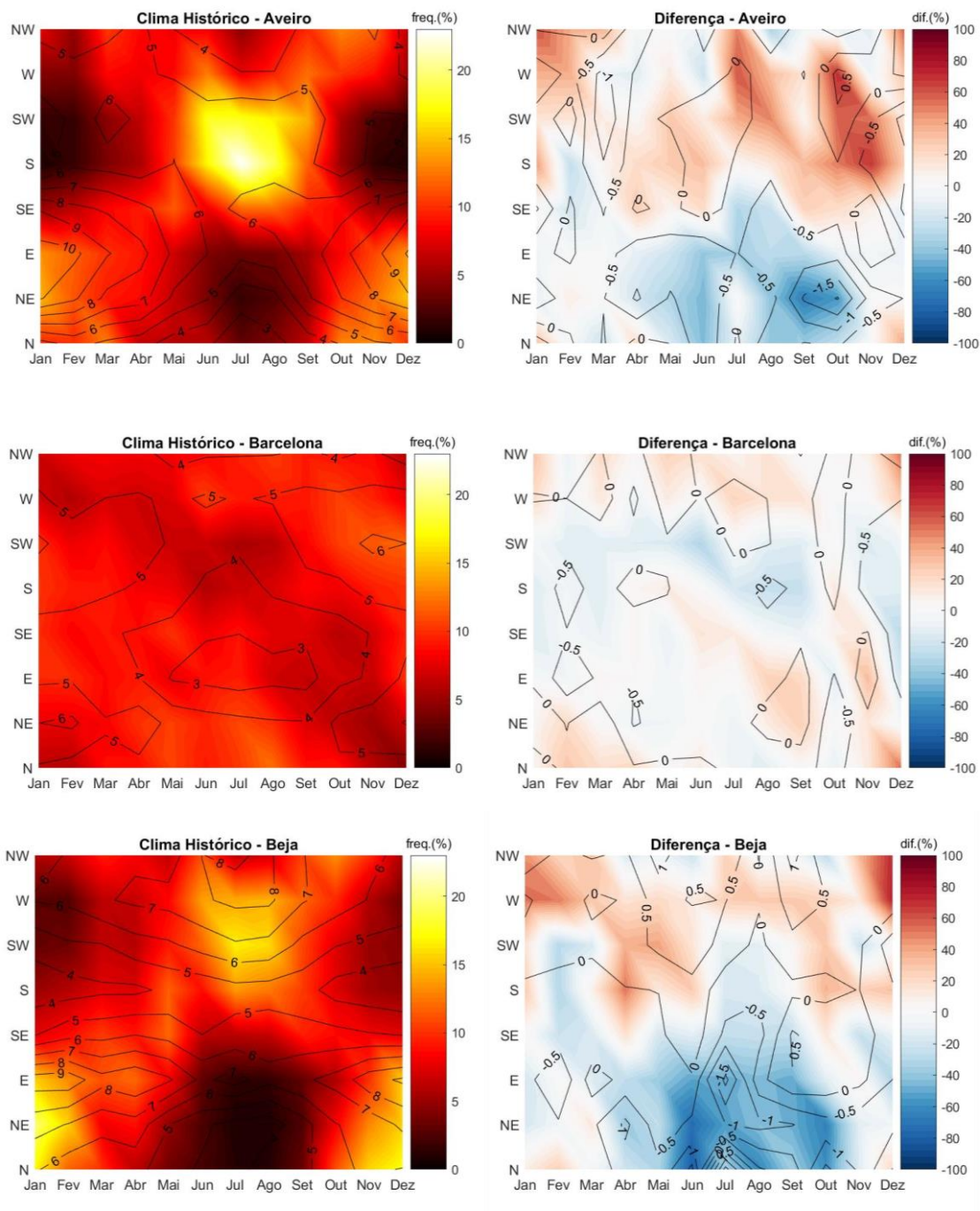
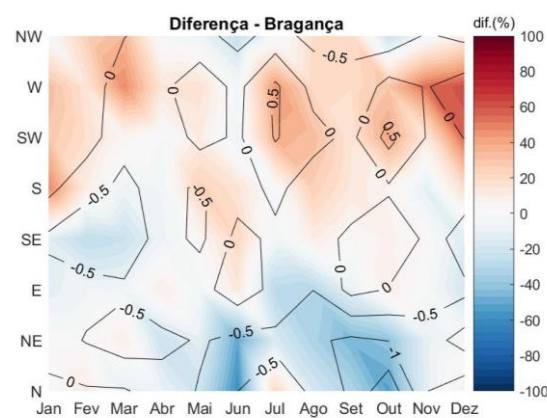
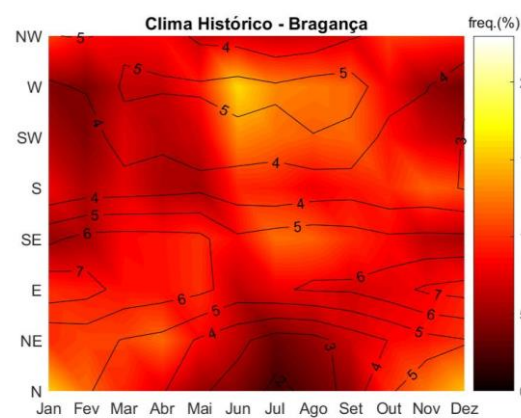
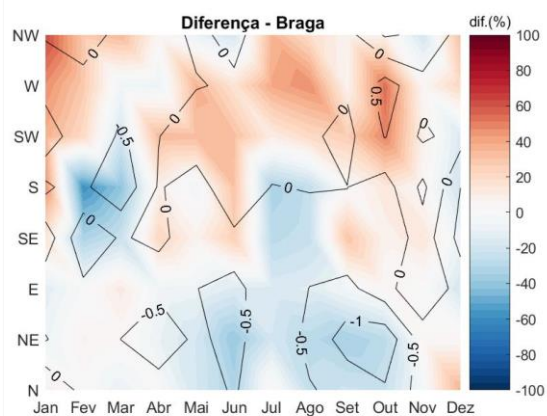
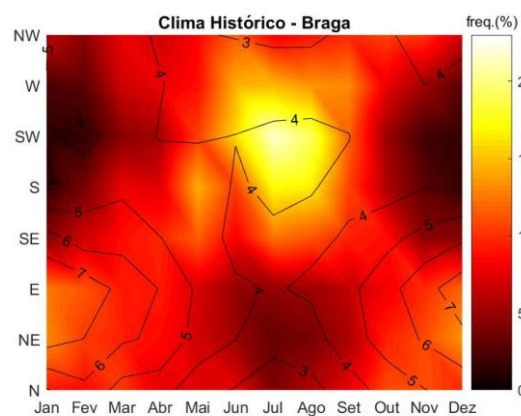
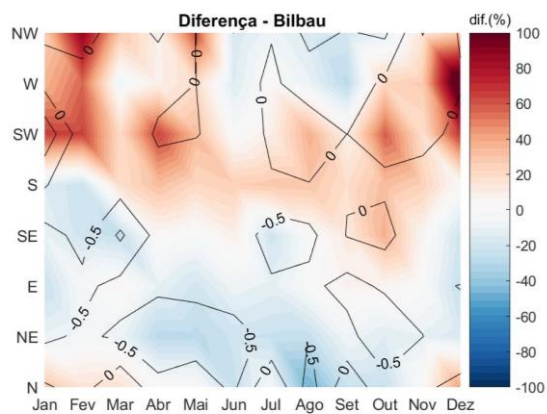
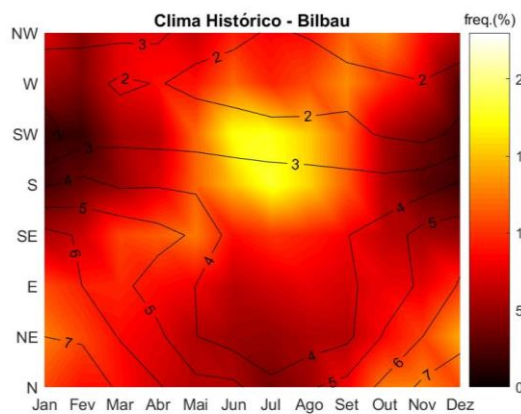
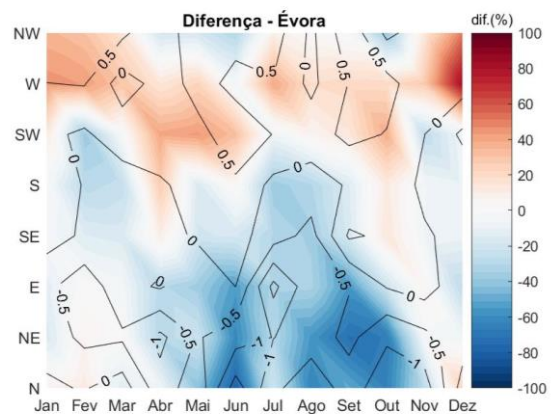
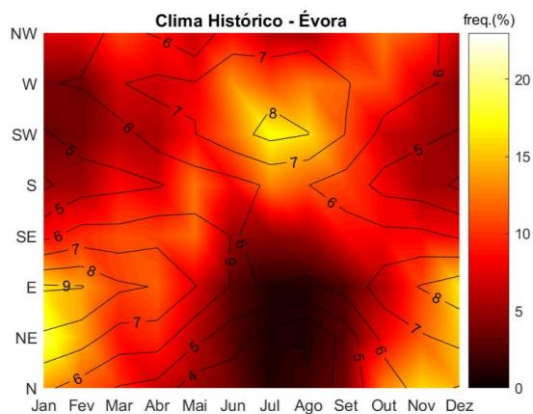
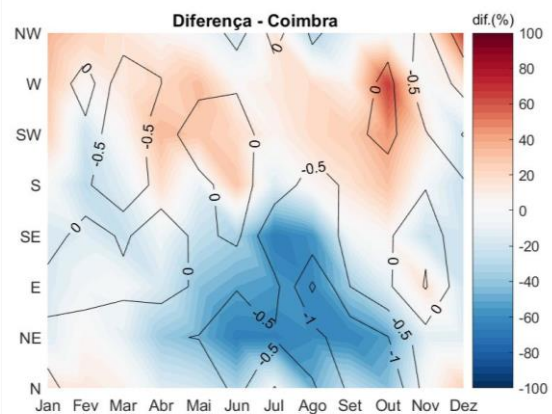
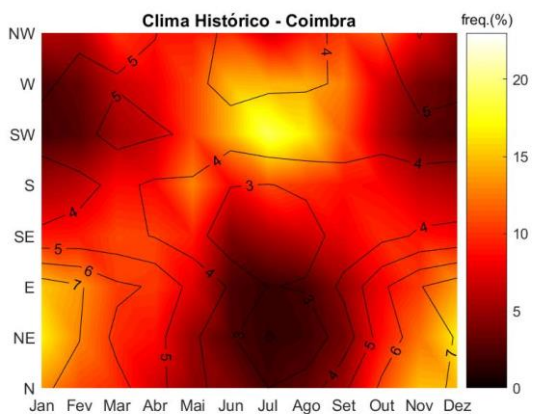
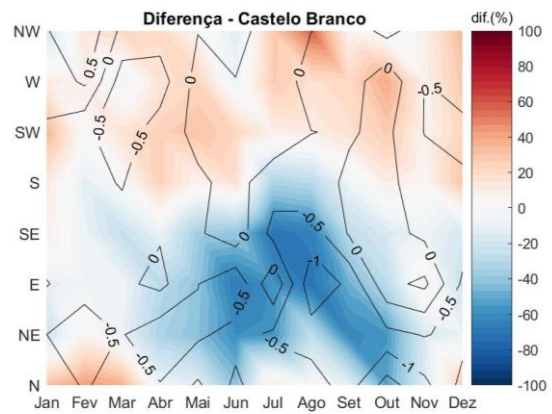
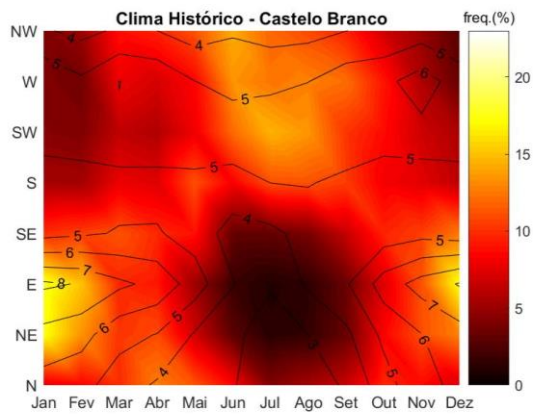
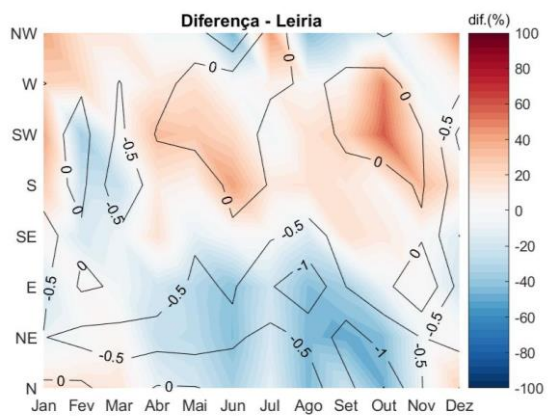
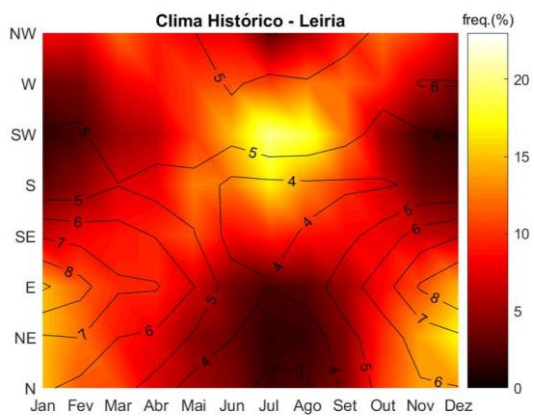
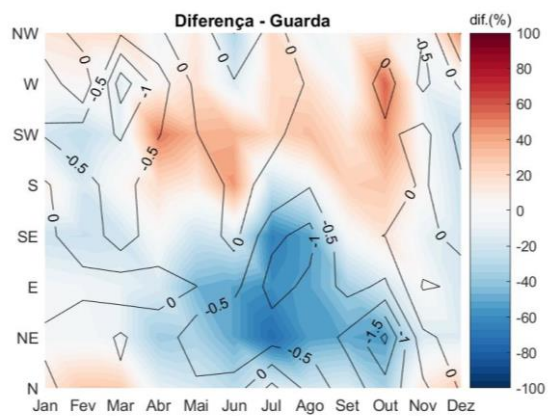
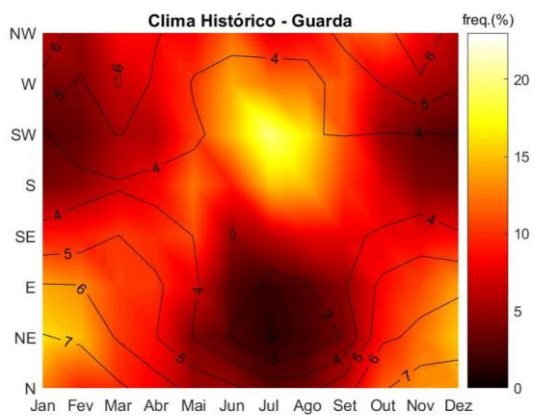
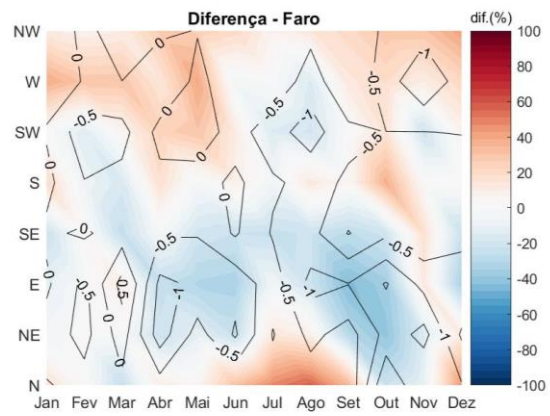
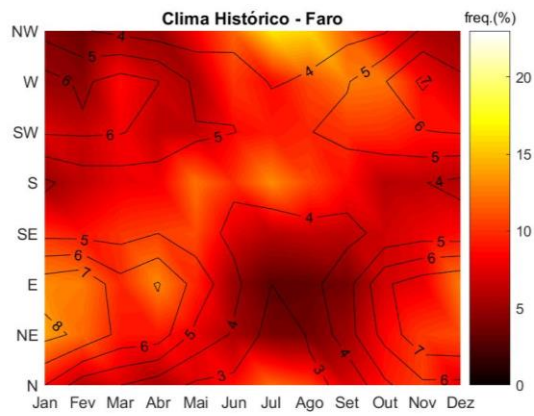


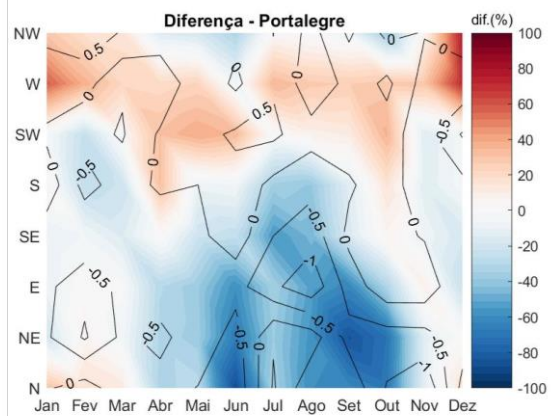
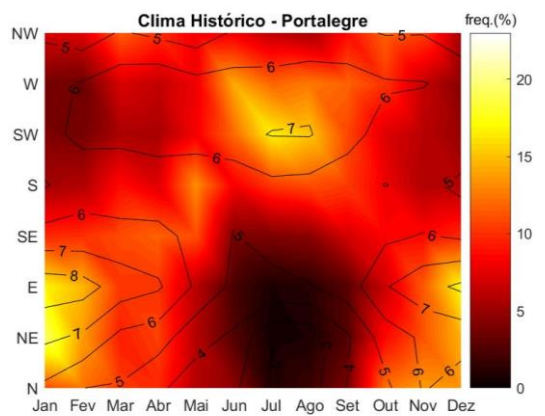
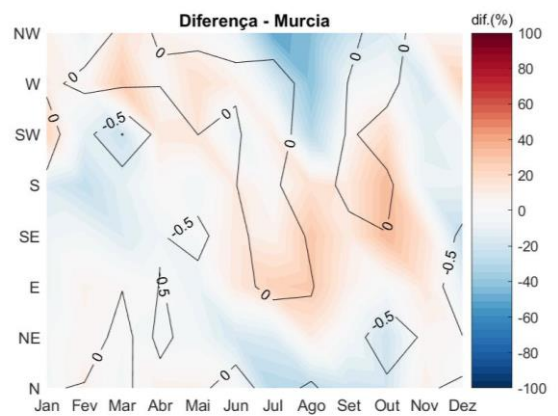
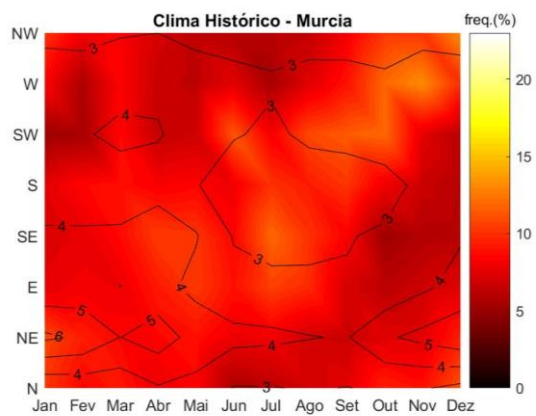
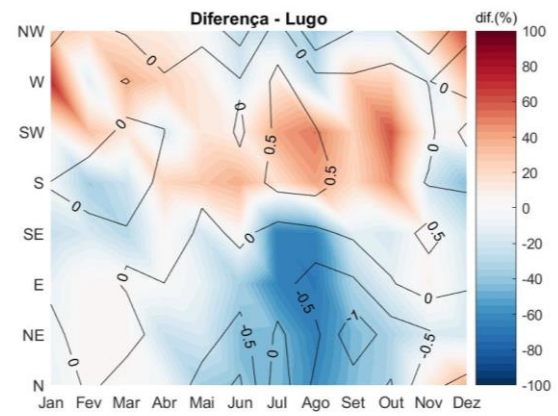
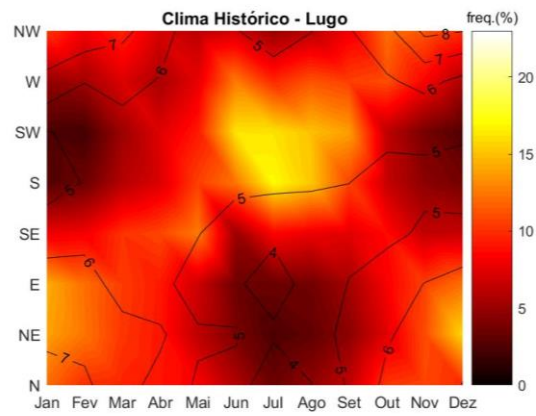
Figura A2 Intensidade e frequência do vento para cada mês e direção, para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid) para o clima histórico (esquerda) e diferenças (%) futuro-histórico (direita).

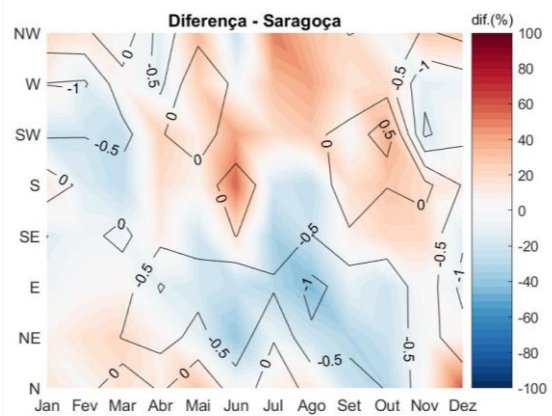
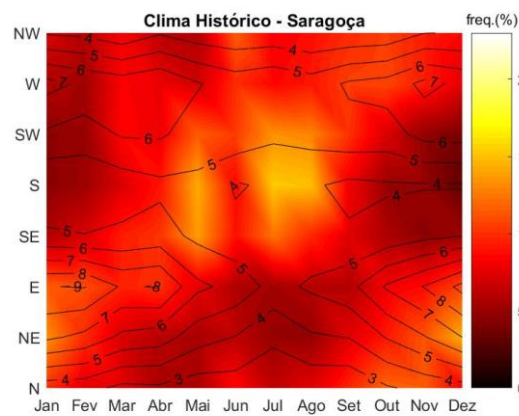
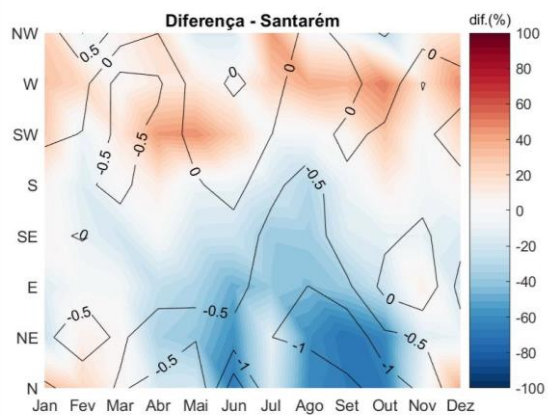
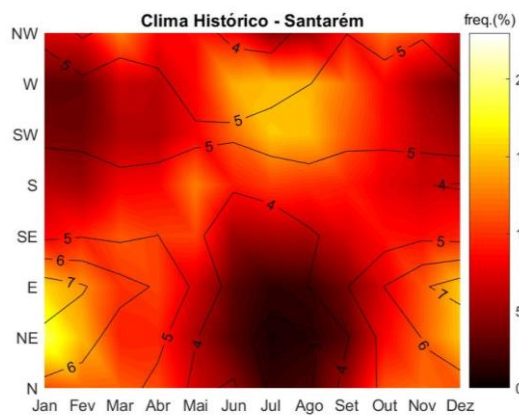
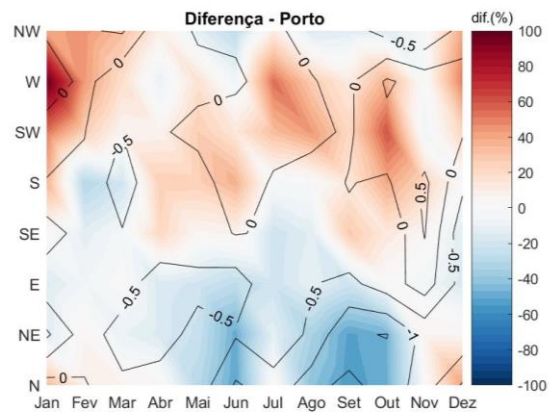
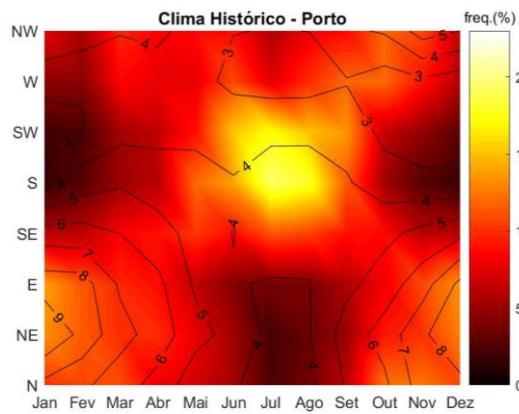


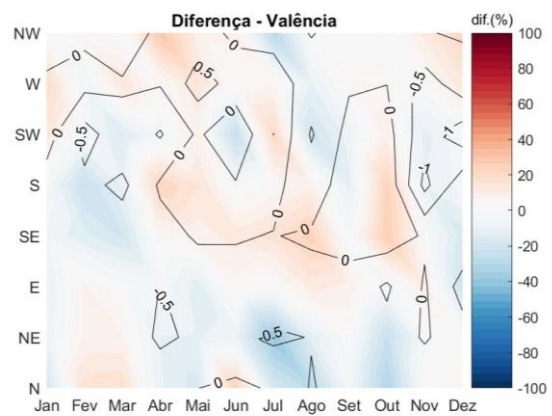
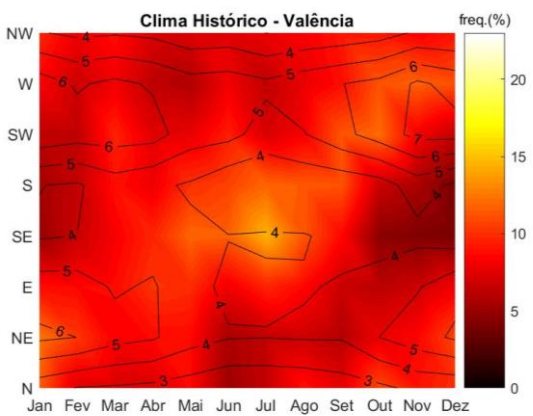
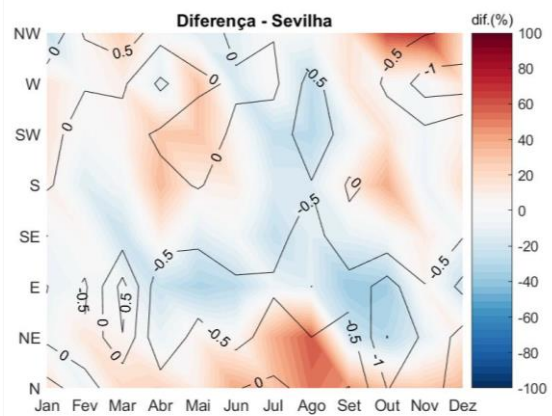
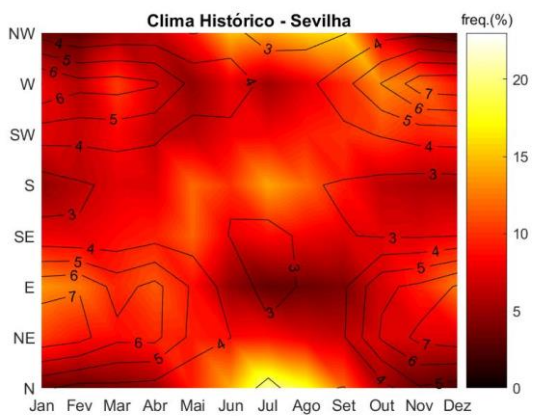
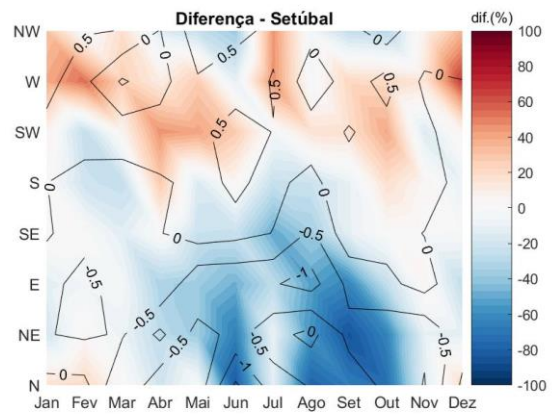
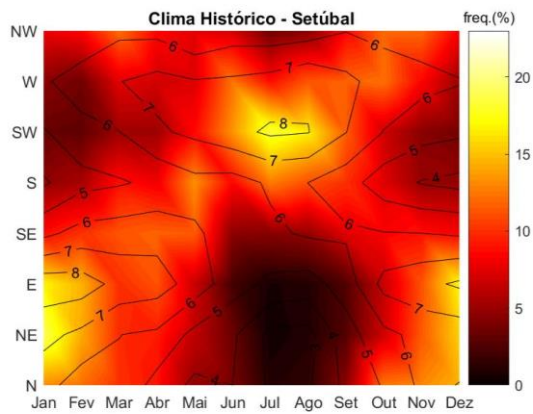












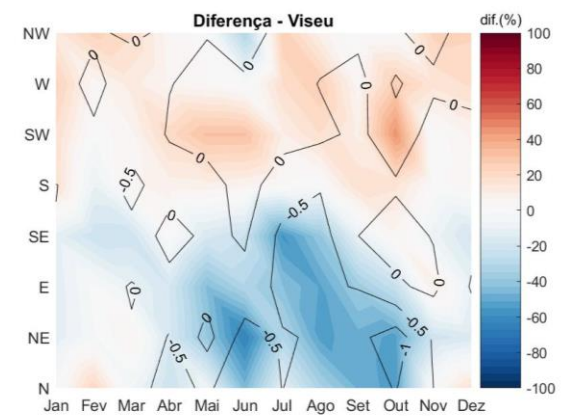
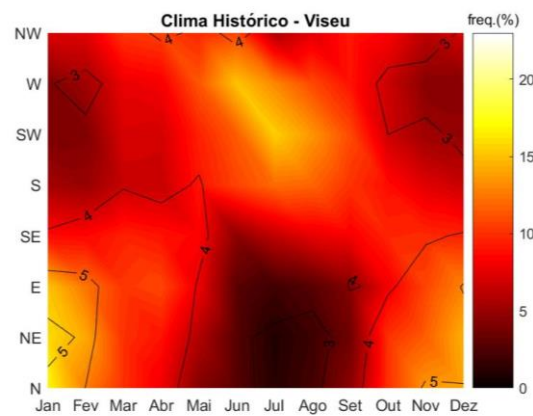
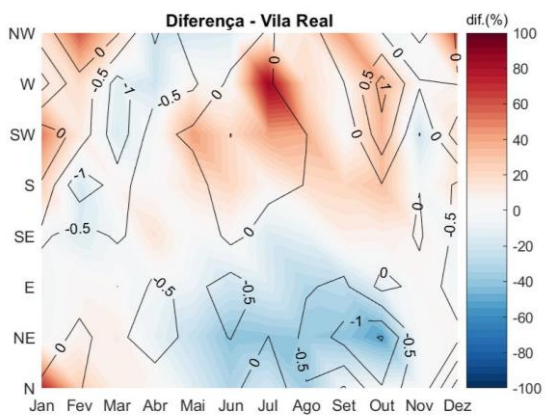
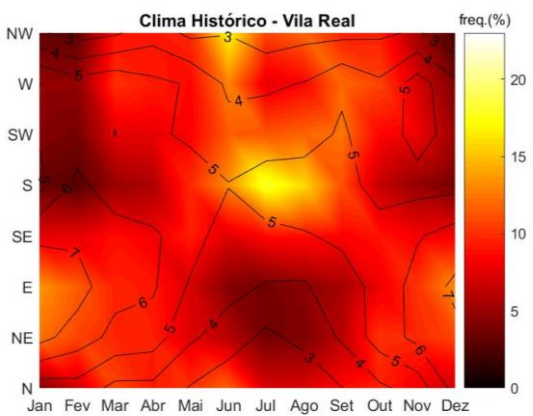
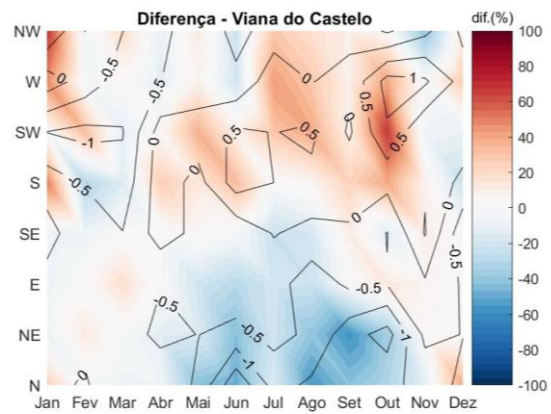
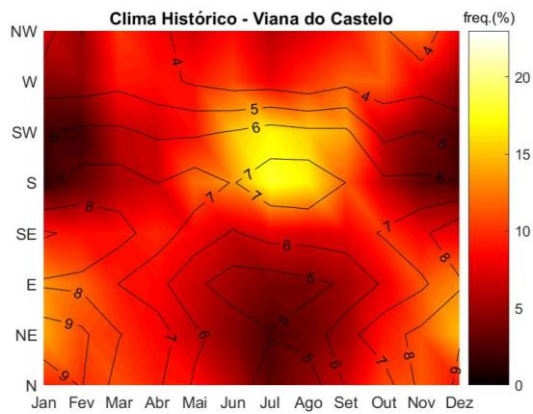
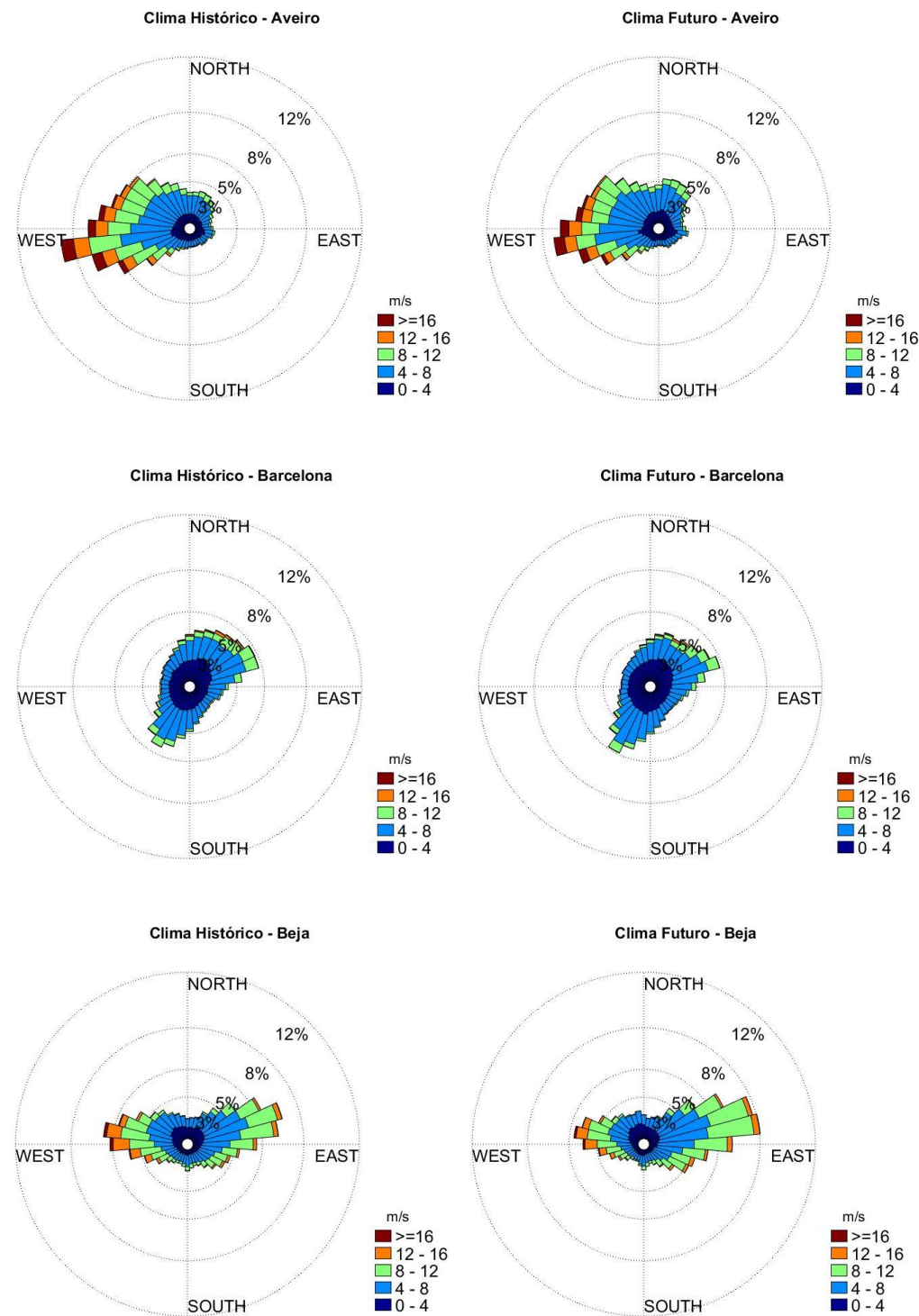
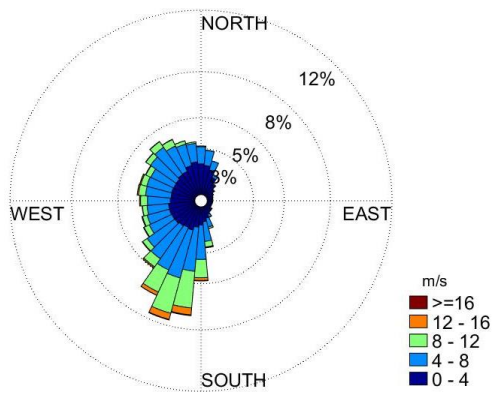


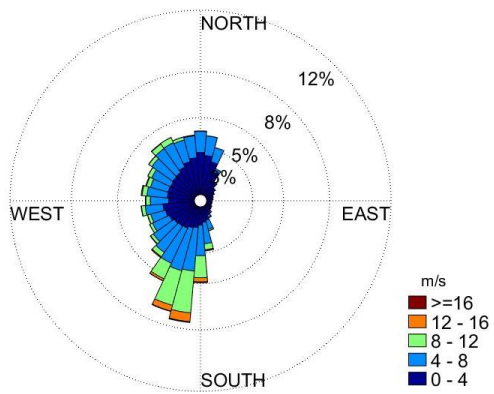
Figura A3 Rosa dos ventos para o vento à superfície, para os climas histórico (à esquerda) e futuro (à direita), para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid).



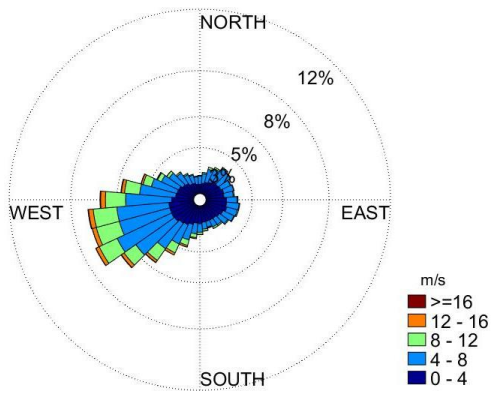
Clima Histórico - Bilbao



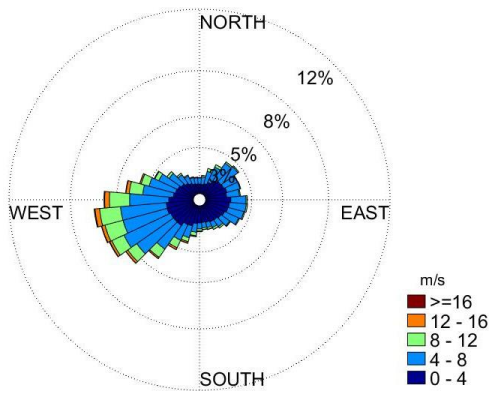
Clima Futuro - Bilbao



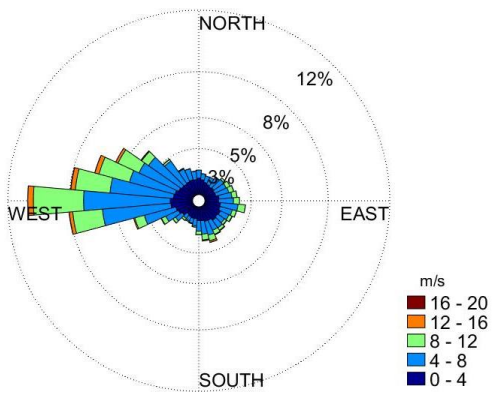
Clima Histórico - Braga



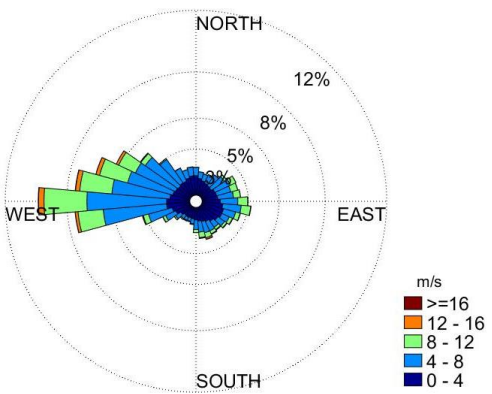
Clima Futuro - Braga



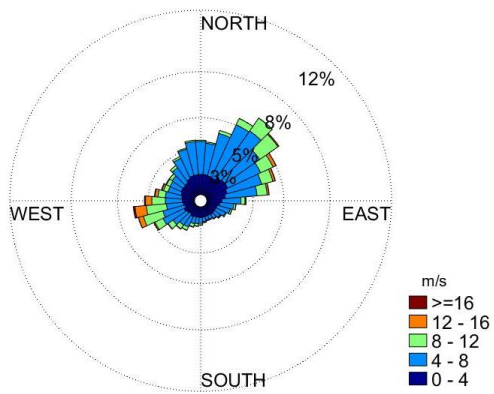
Clima Histórico - Bragança



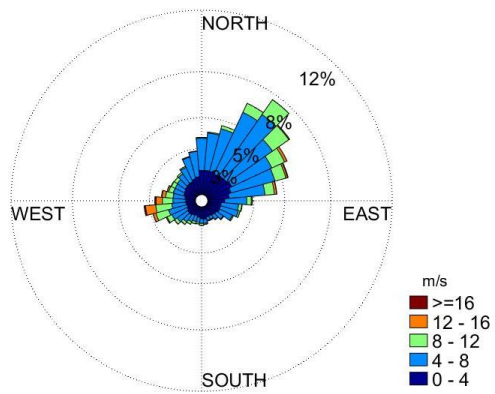
Clima Futuro - Bragança



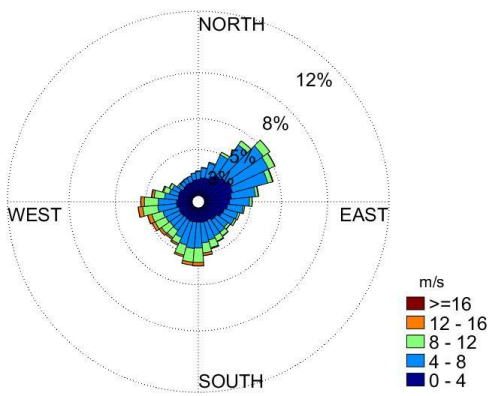
Clima Histórico - Castelo Branco



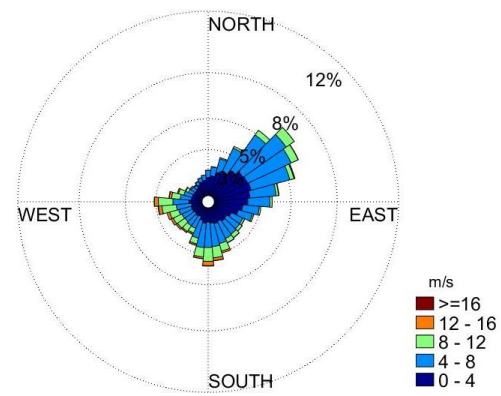
Clima Futuro - Castelo Branco



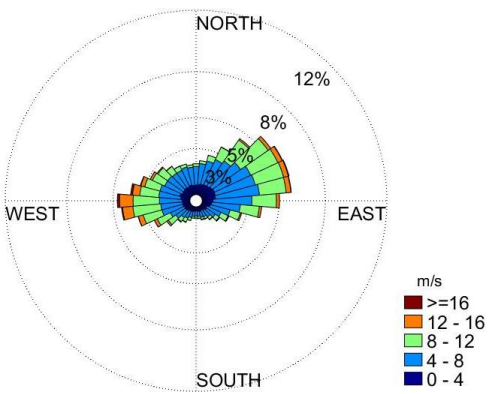
Clima Histórico - Coimbra



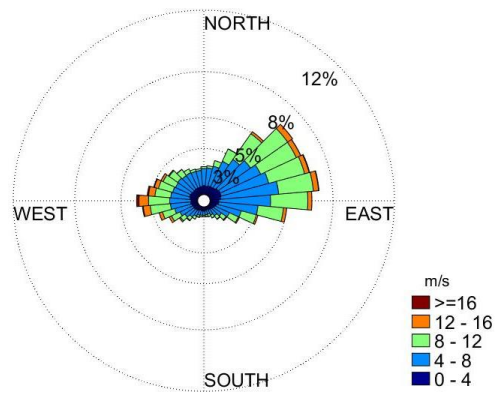
Clima Futuro - Coimbra



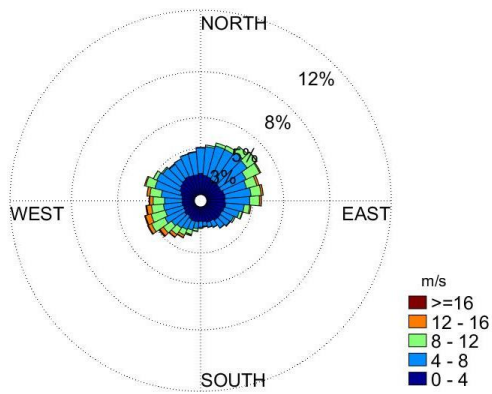
Clima Histórico - Évora



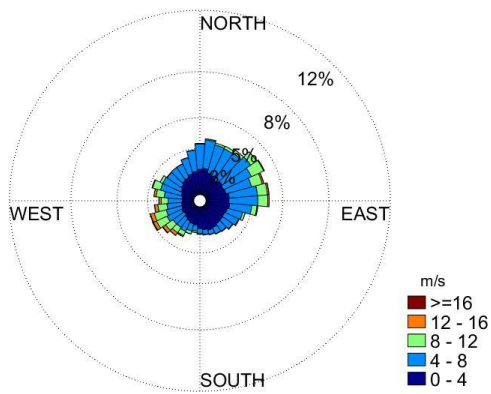
Clima Futuro - Évora



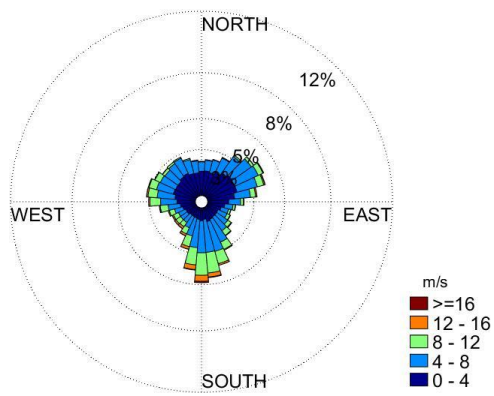
Clima Histórico - Faro



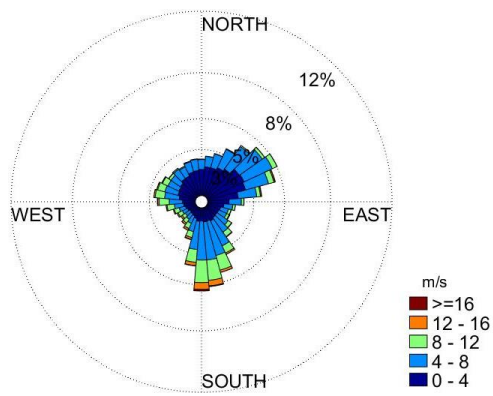
Clima Futuro - Faro



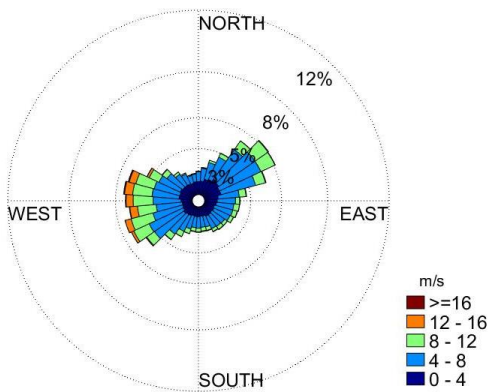
Clima Histórico - Guarda



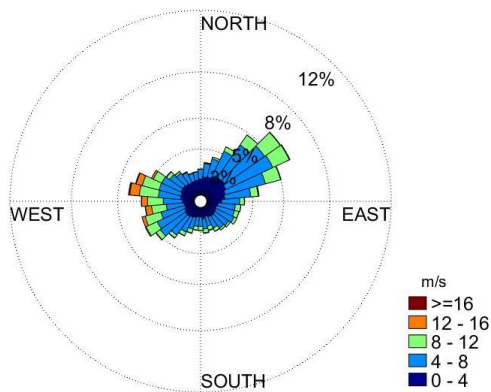
Clima Futuro - Guarda



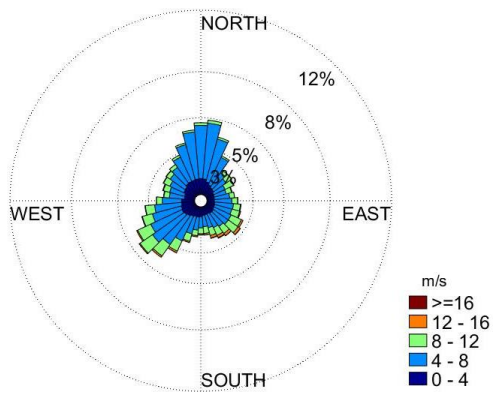
Clima Histórico - Leiria



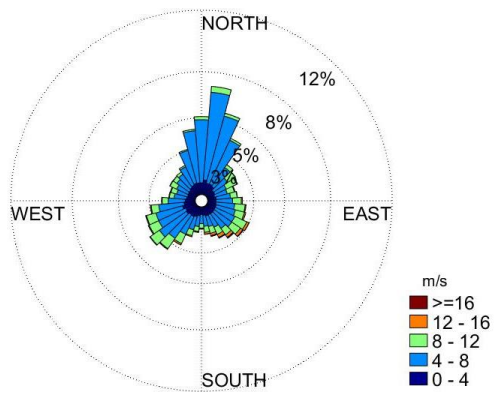
Clima Futuro - Leiria



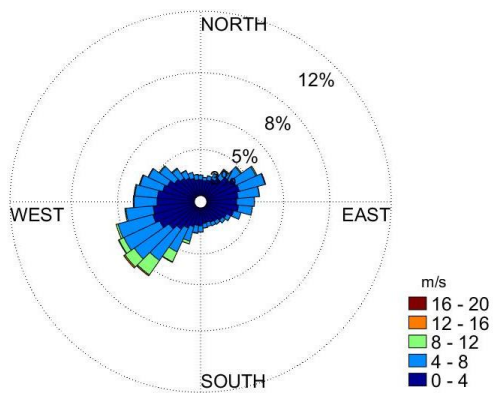
Clima Histórico - Lugo



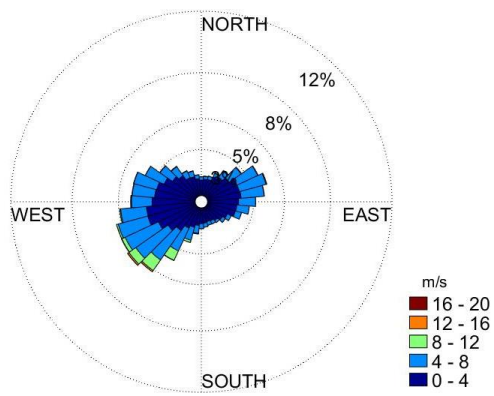
Clima Futuro - Lugo



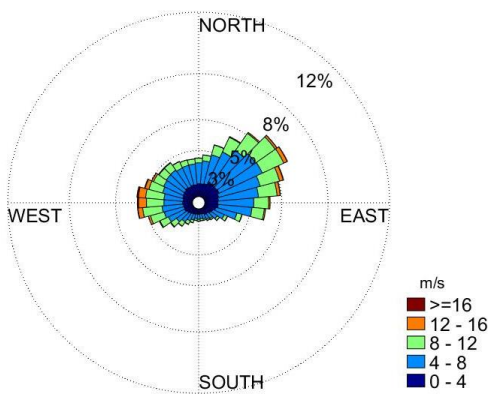
Clima Histórico - Murcia



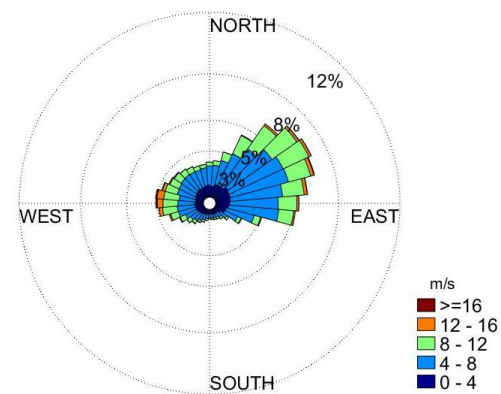
Clima Futuro - Murcia



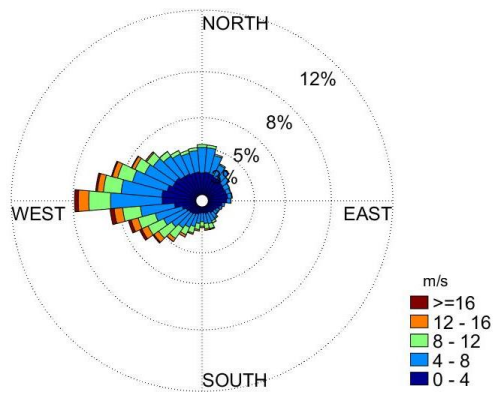
Clima Histórico - Portalegre



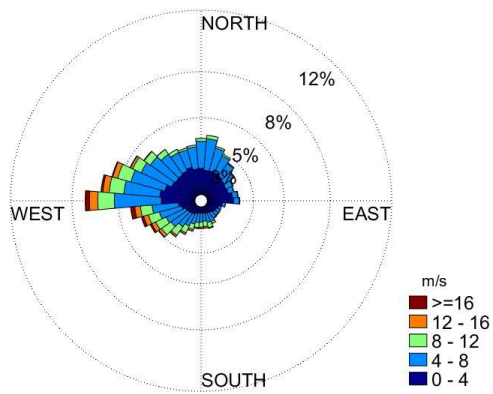
Clima Futuro - Portalegre



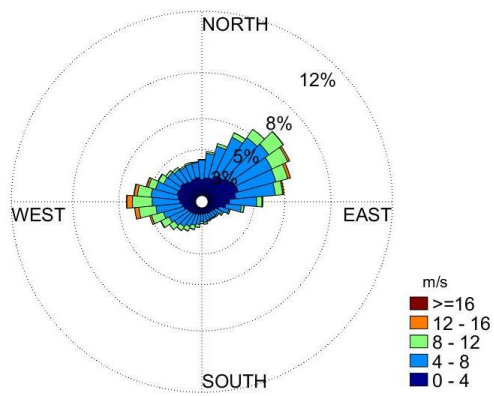
Clima Histórico - Porto



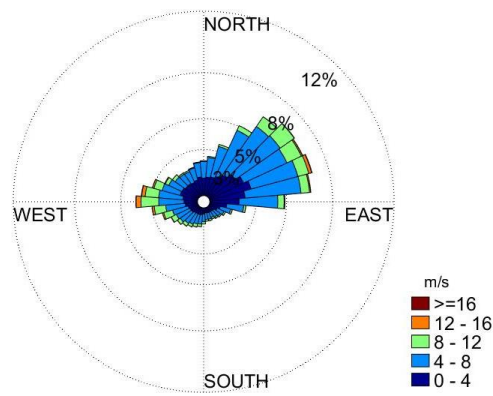
Clima Futuro - Porto



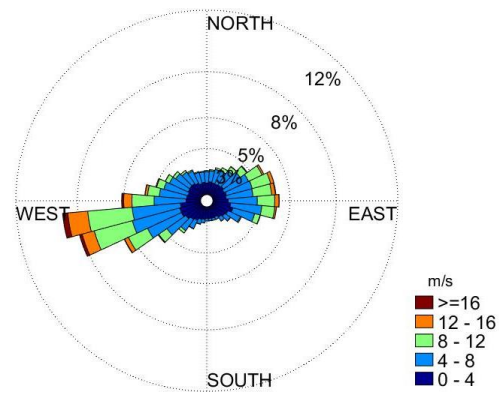
Clima Histórico - Santarém



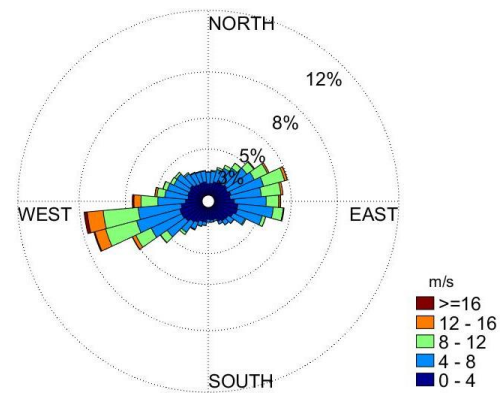
Clima Futuro - Santarém



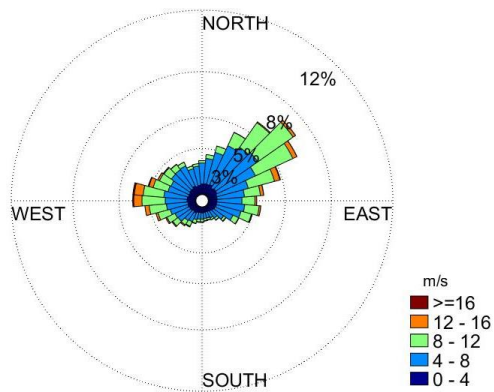
Clima Histórico - Saragoça



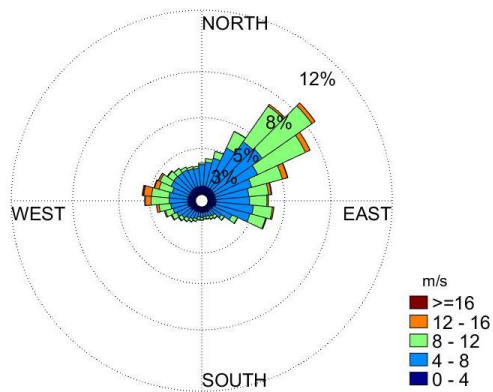
Clima Futuro - Saragoça



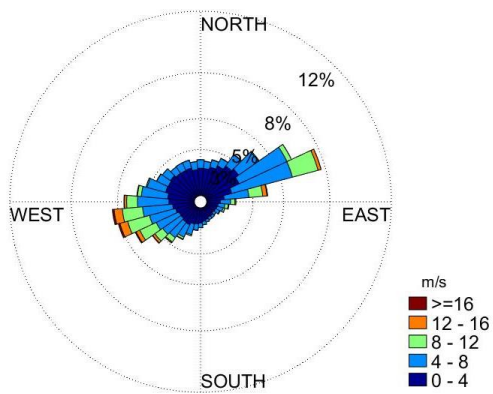
Clima Histórico - Setúbal



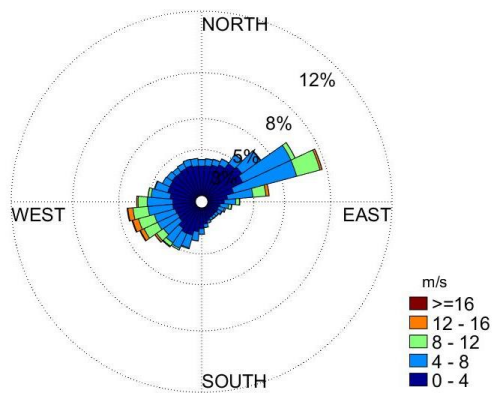
Clima Futuro - Setúbal



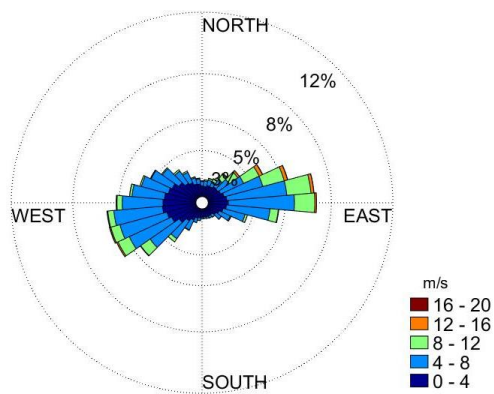
Clima Histórico - Sevilha



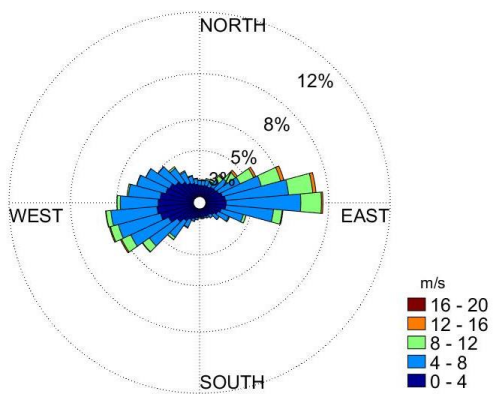
Clima Futuro - Sevilha



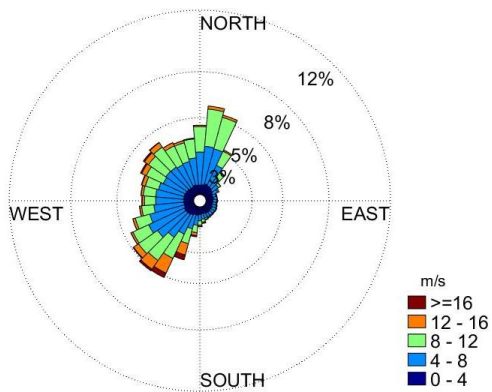
Clima Histórico - Valência



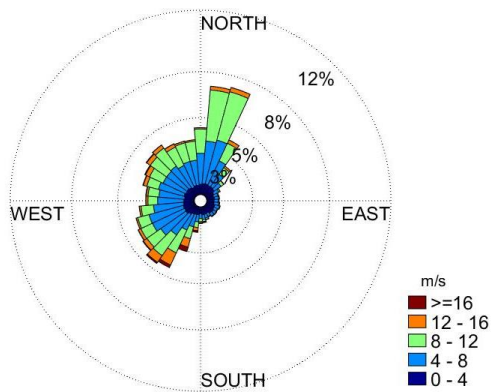
Clima Futuro - Valência



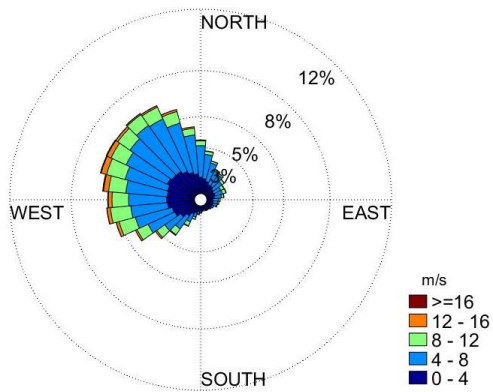
Clima Histórico - Viana do Castelo



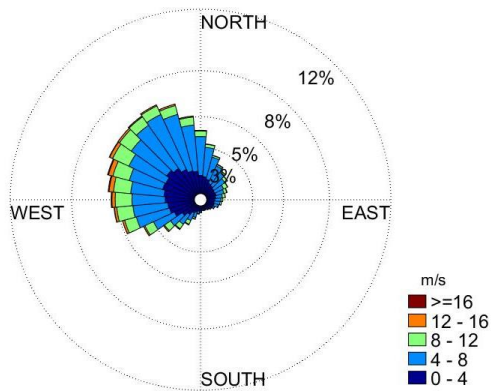
Clima Futuro - Viana do Castelo



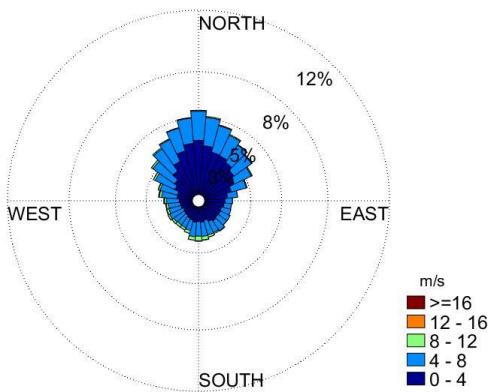
Clima Histórico - Vila Real



Clima Futuro - Vila Real



Clima Histórico - Viseu



Clima Futuro - Viseu

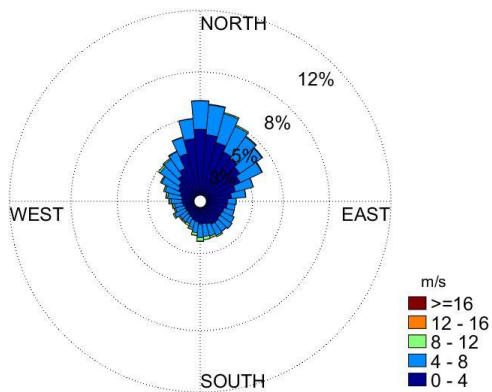
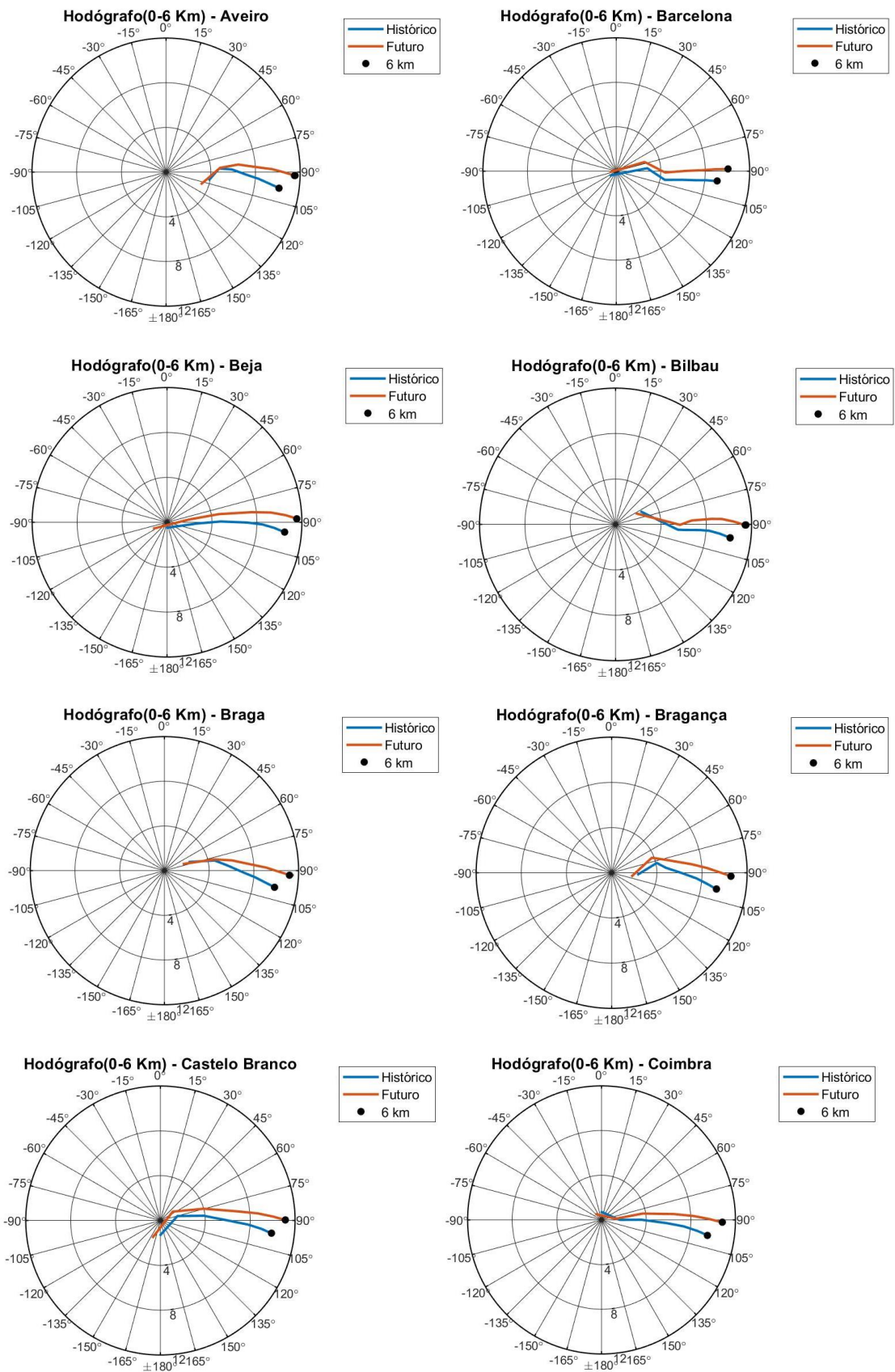
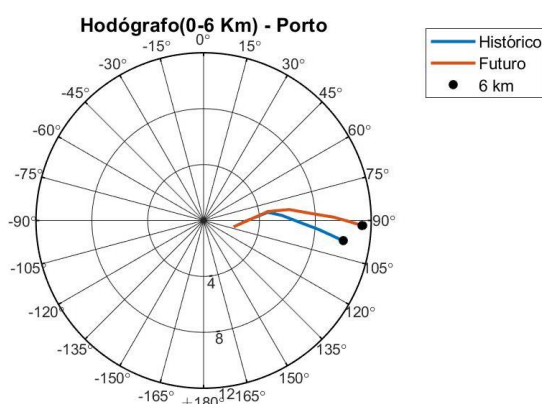
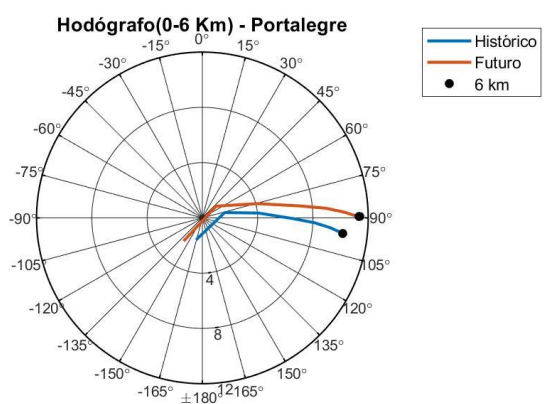
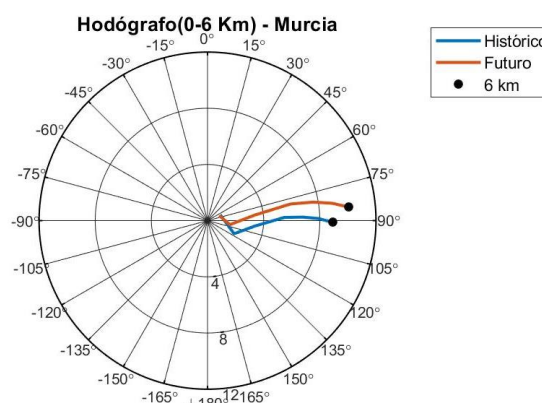
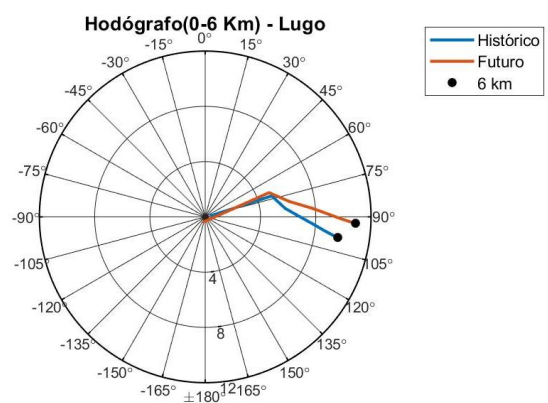
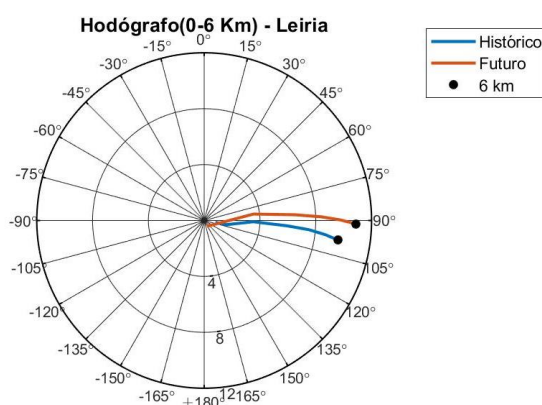
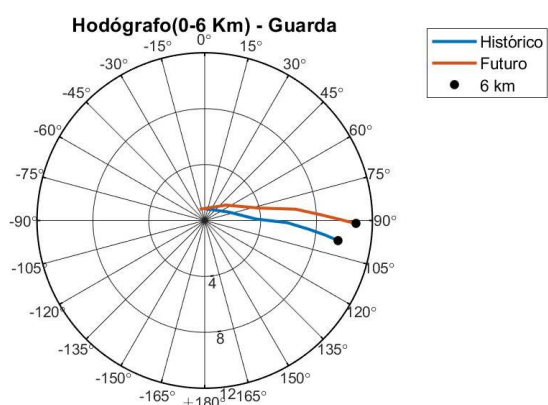
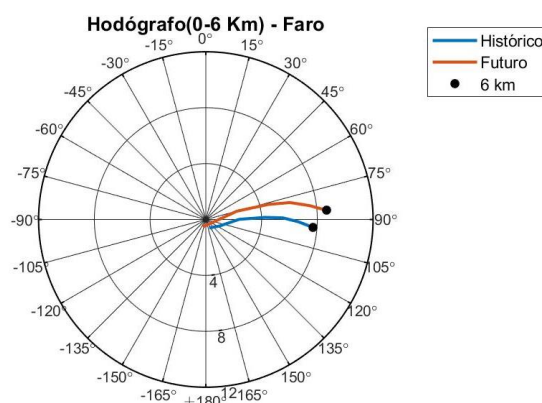
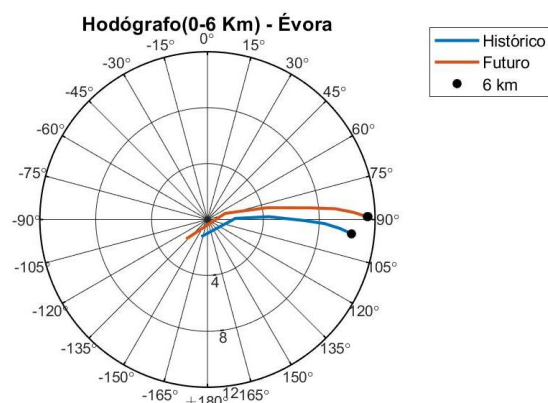


Figura A4 Hodógrafos para todas as cidades (exceto Lisboa e Madrid) dos 0 aos 6 km, para o clima histórico (azul) e para o clima futuro (vermelho).





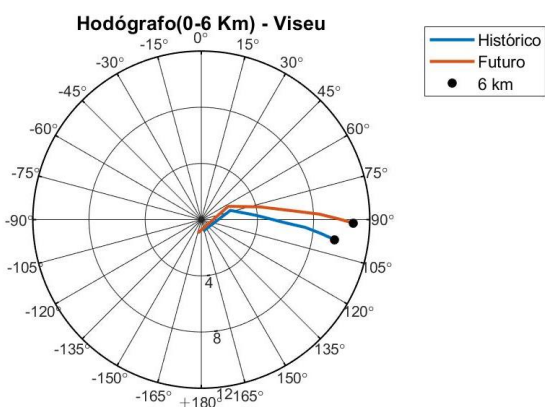
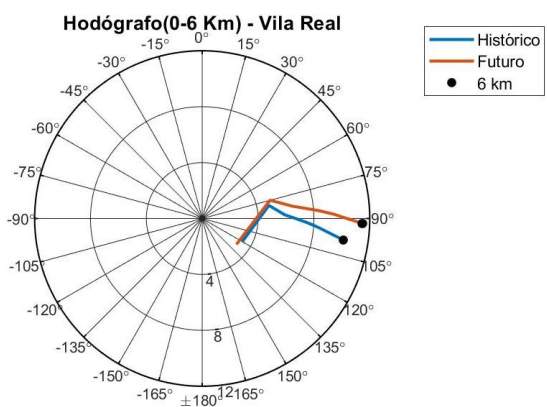
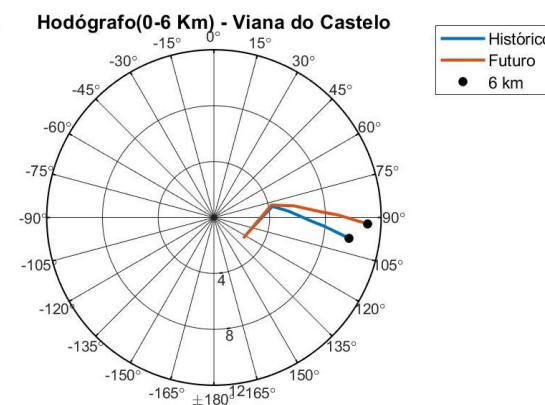
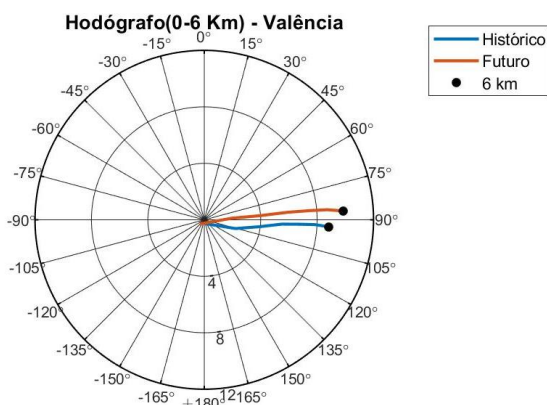
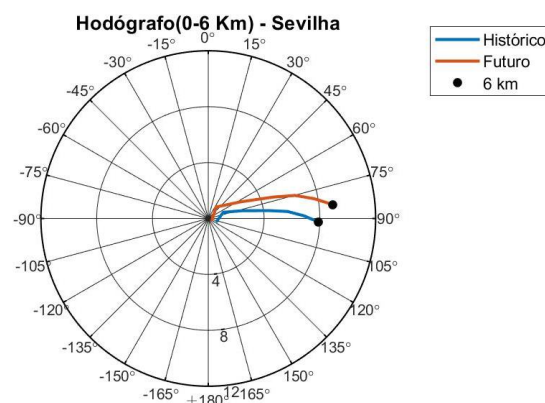
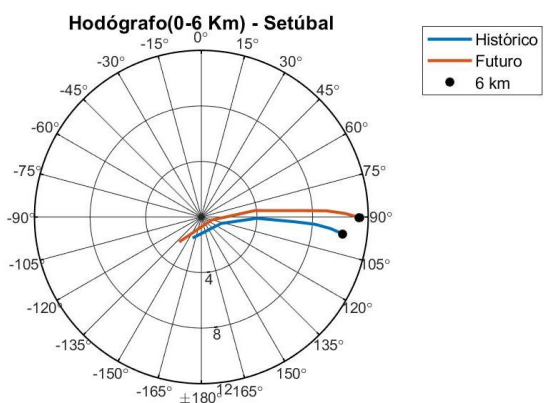
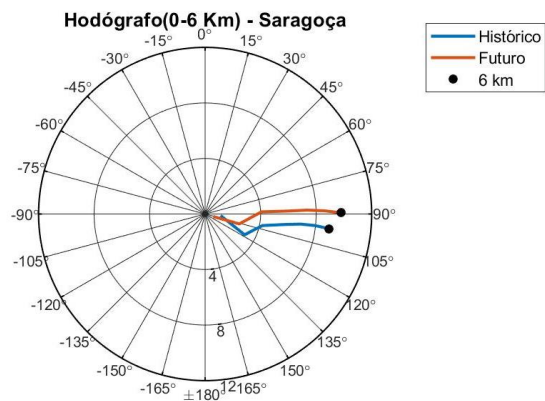
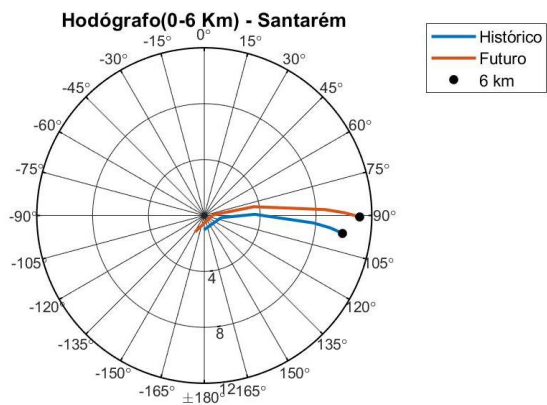


Figura A5 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a intensidade do vento aos 850 hPa.

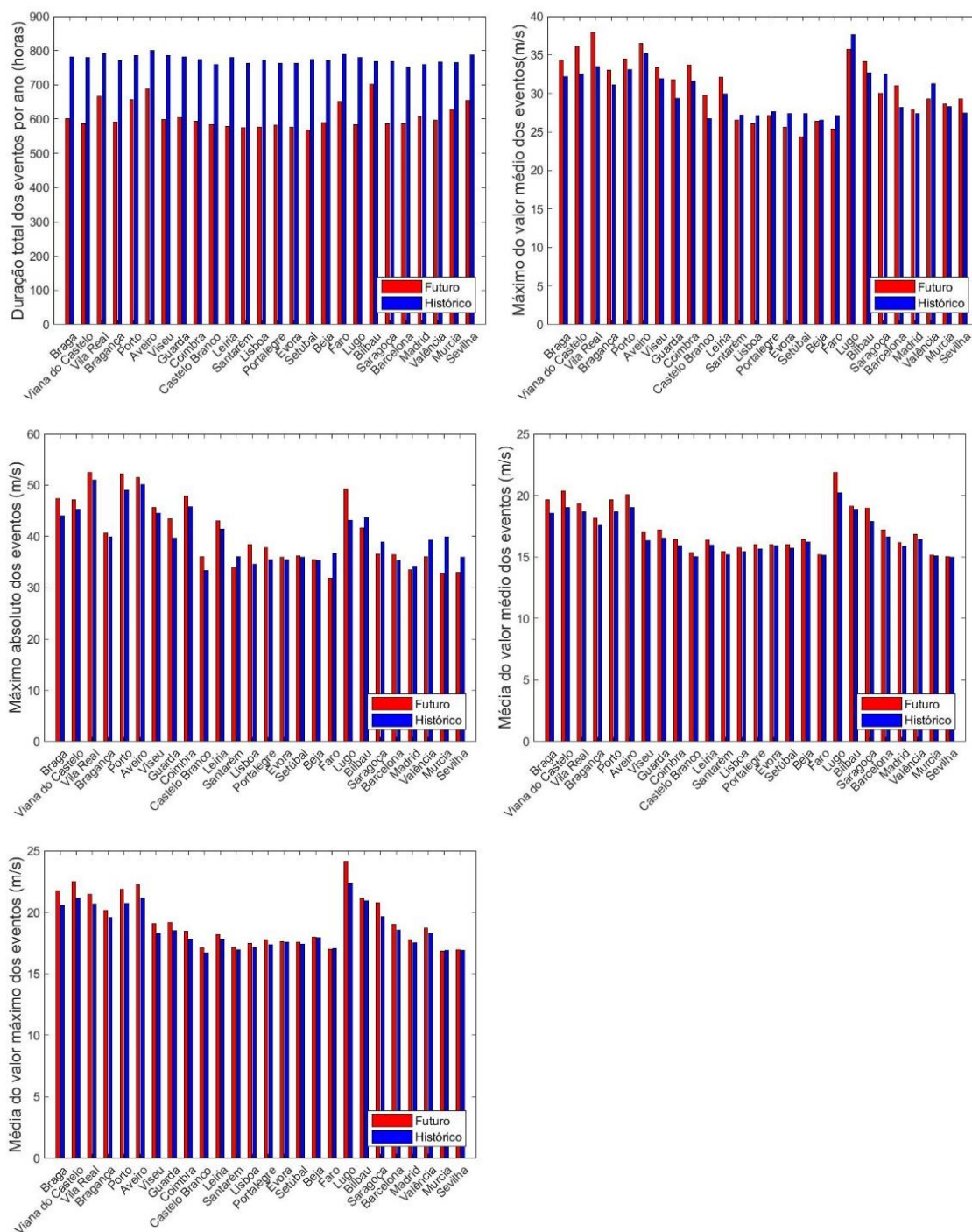


Figura A6 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a intensidade do vento aos 300 hPa.

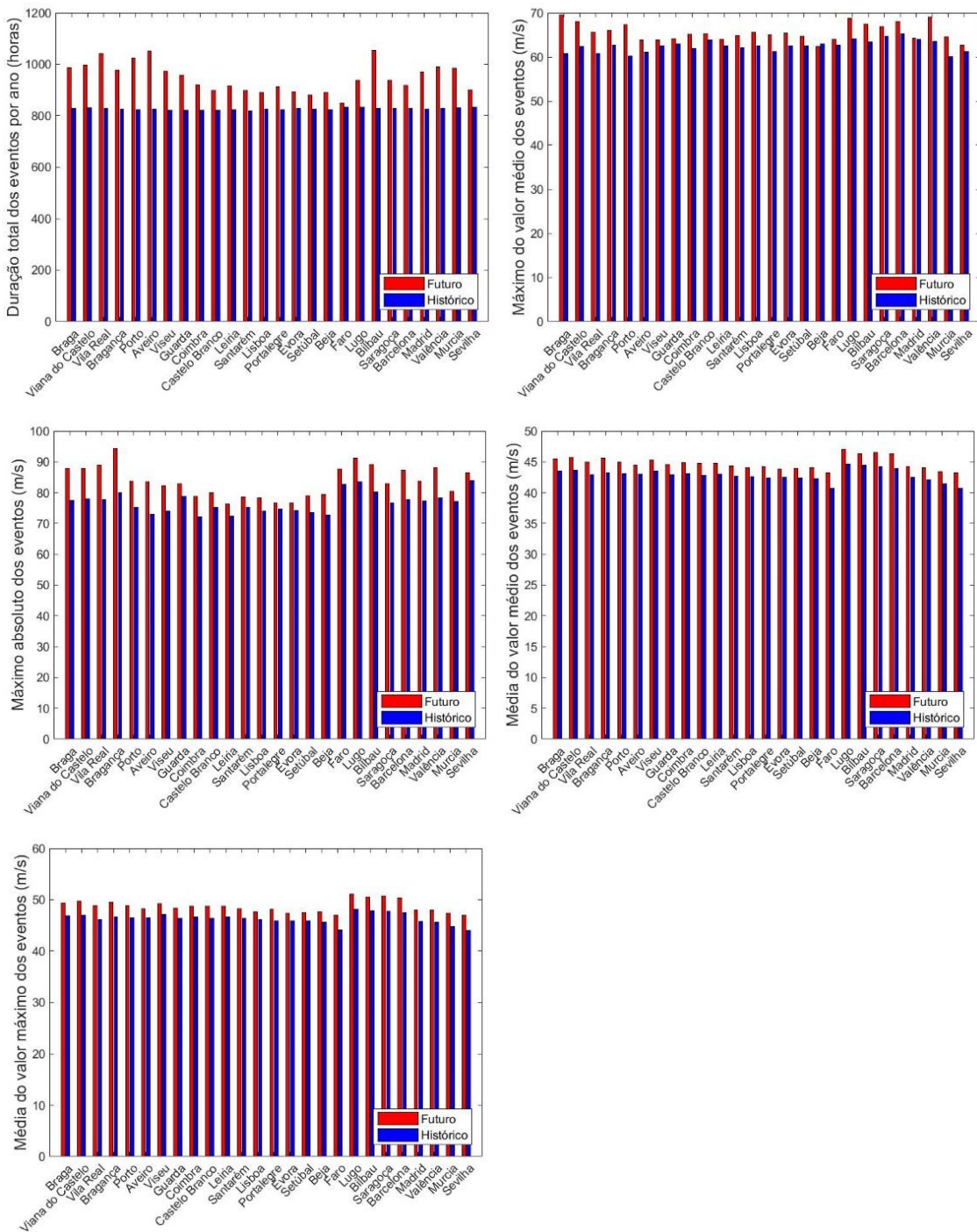


Figura A7 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km.

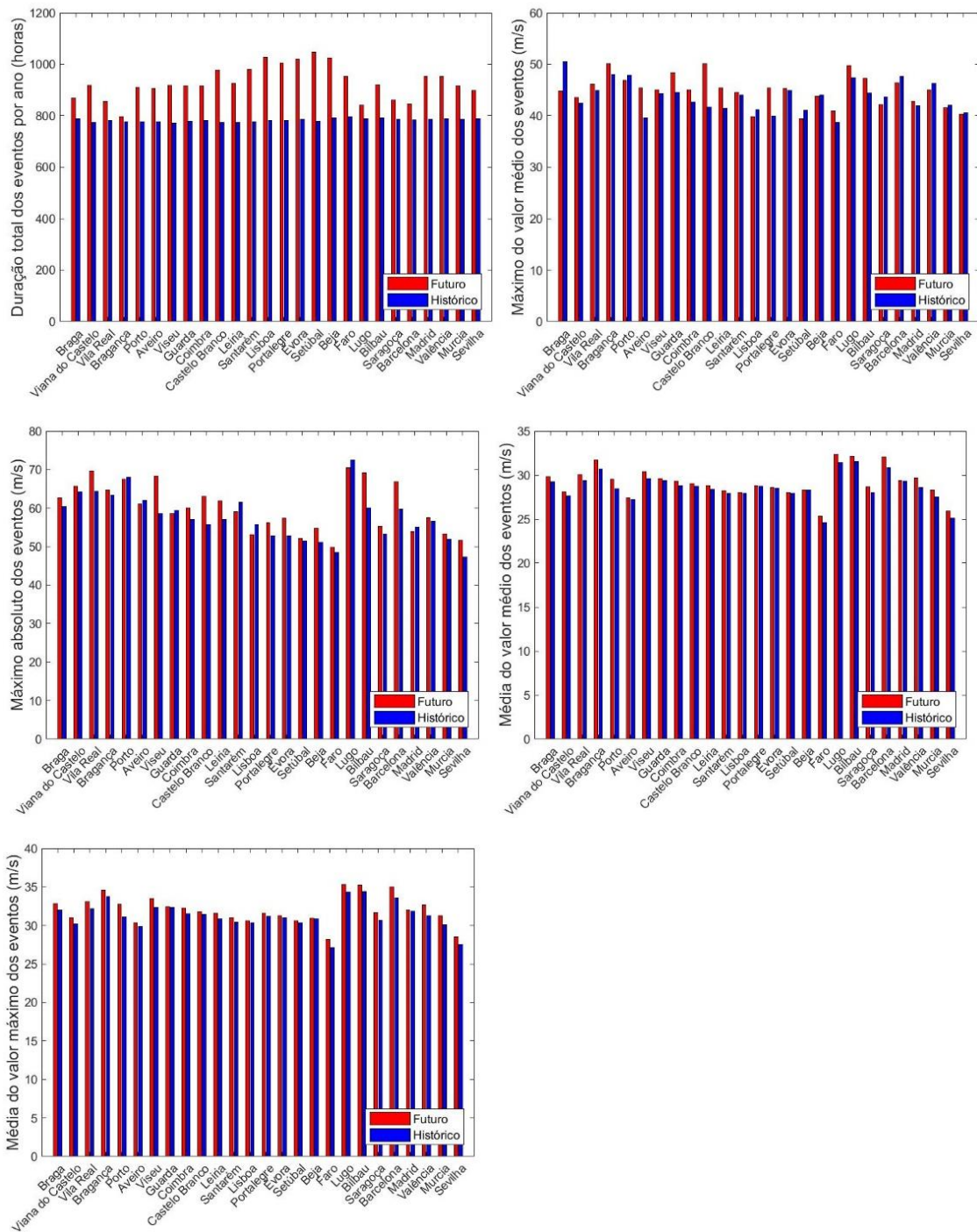


Figura A8 Duração total (horas) dos eventos por ano, máximo do valor médio dos eventos, máximo absoluto dos eventos, média do valor médio dos eventos e média do valor máximo dos eventos, para os climas histórico (azul) e futuro (vermelho) em todas as cidades, para a helicidade dos 0 aos 3 km.

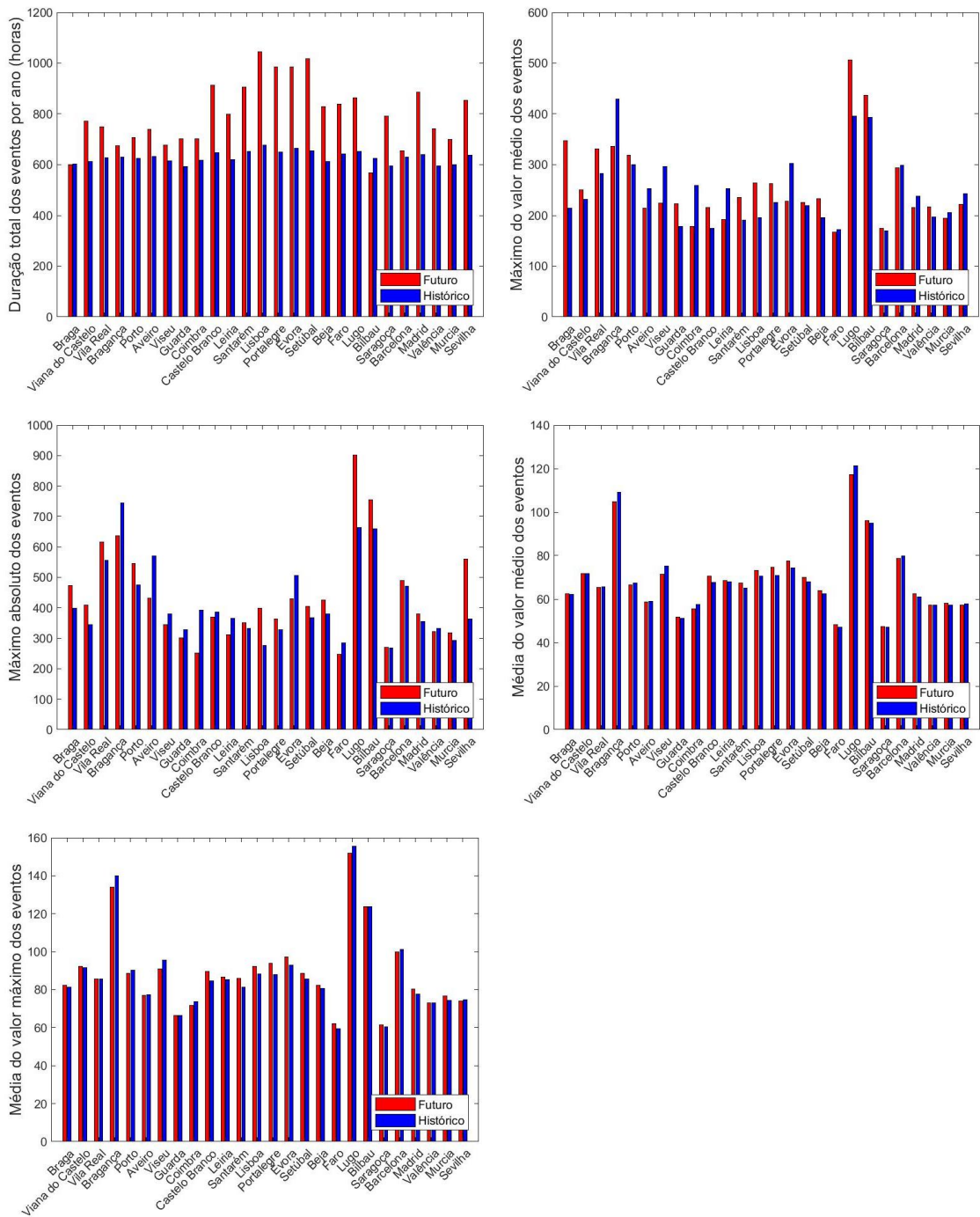
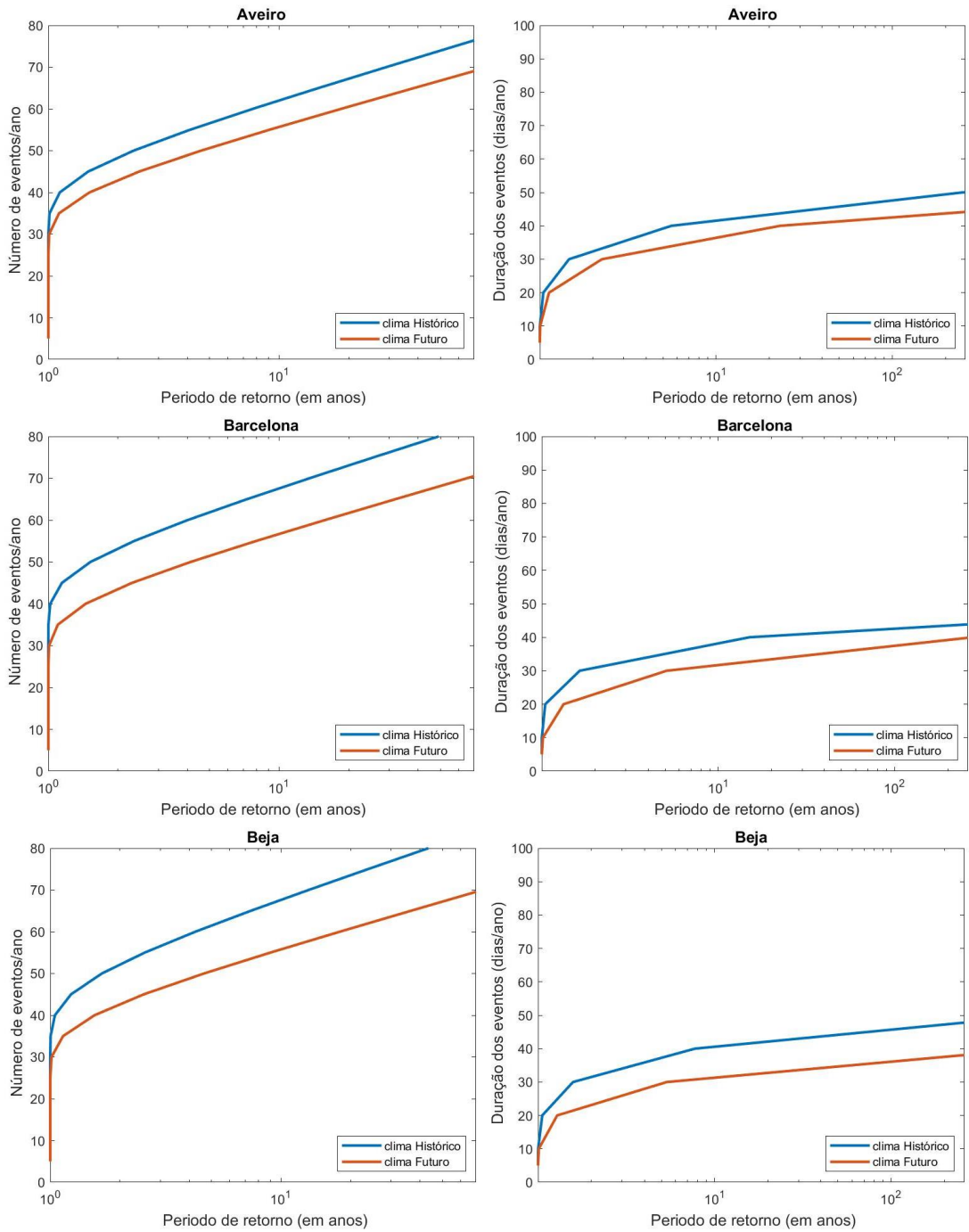
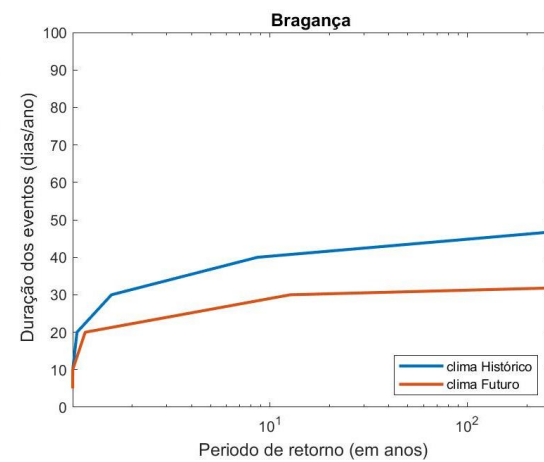
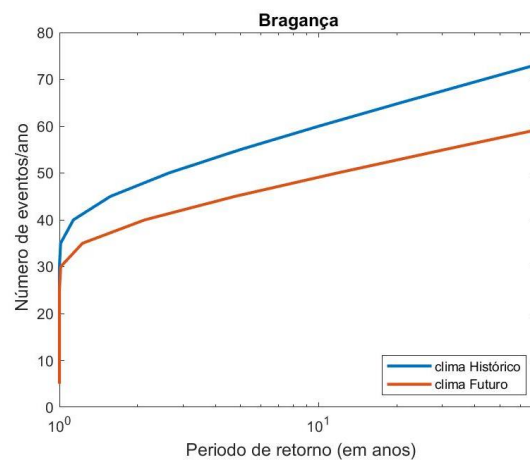
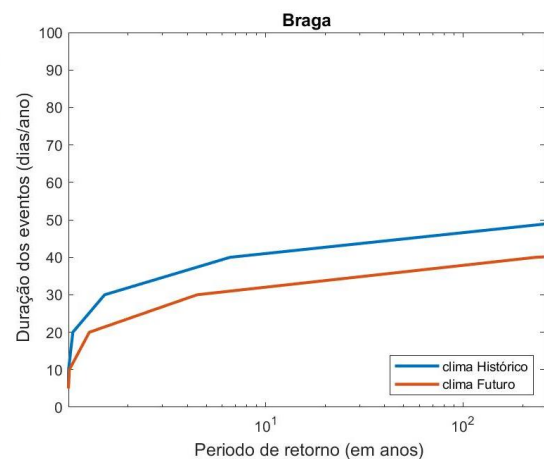
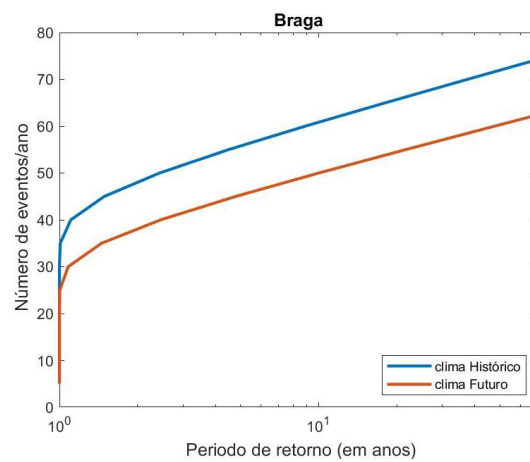
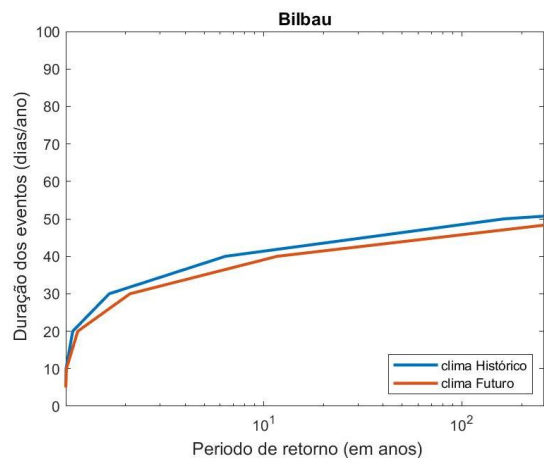
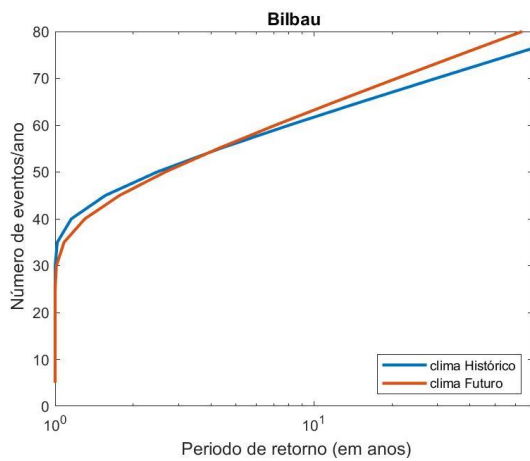
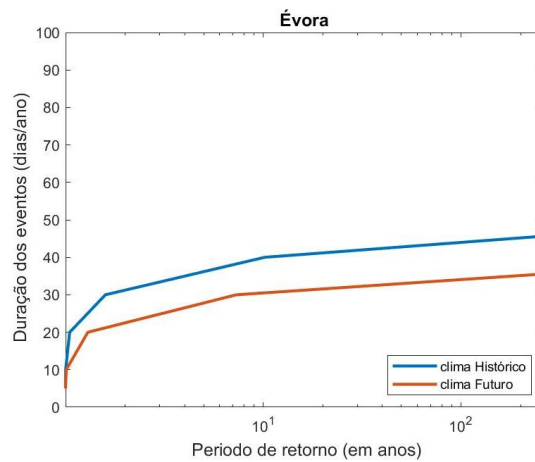
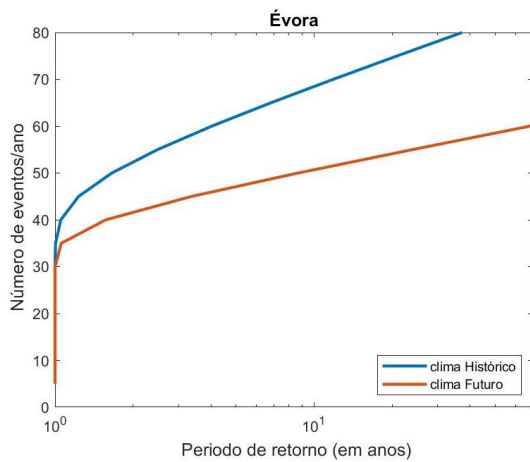
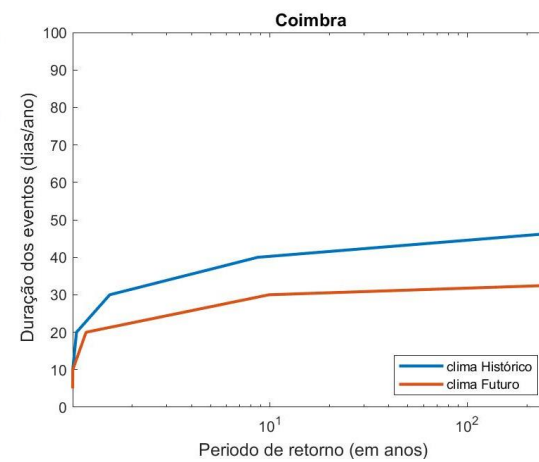
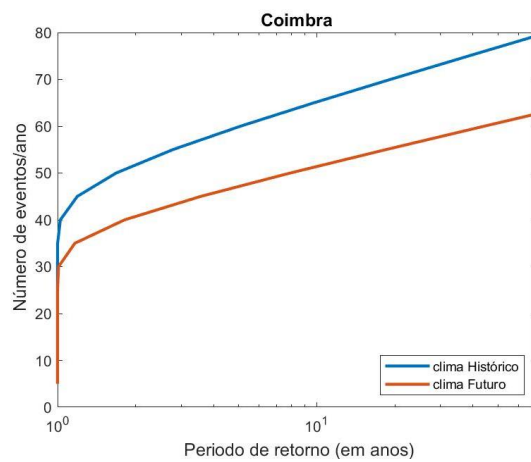
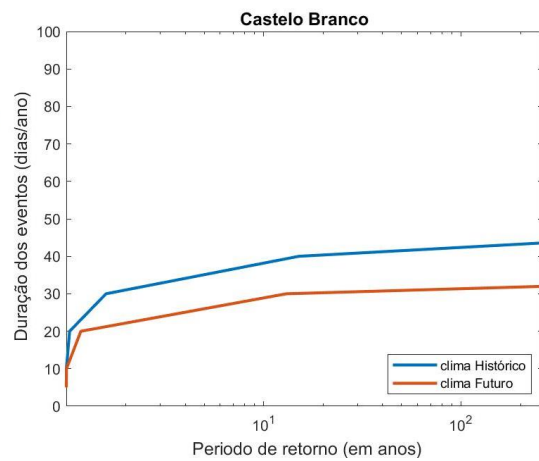
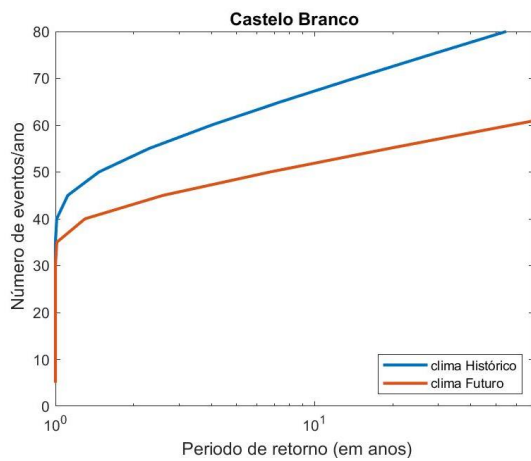
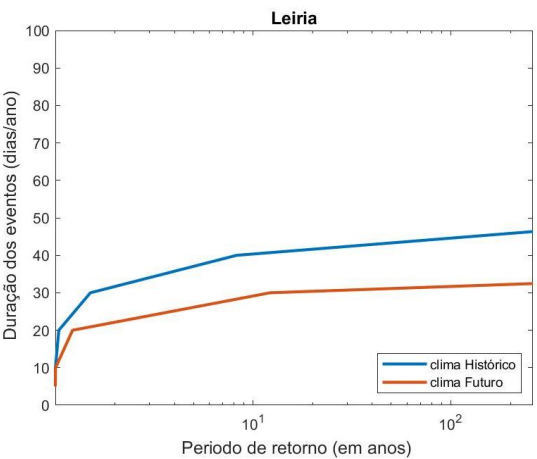
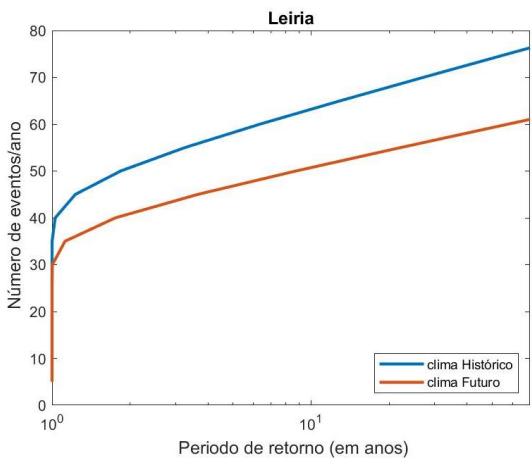
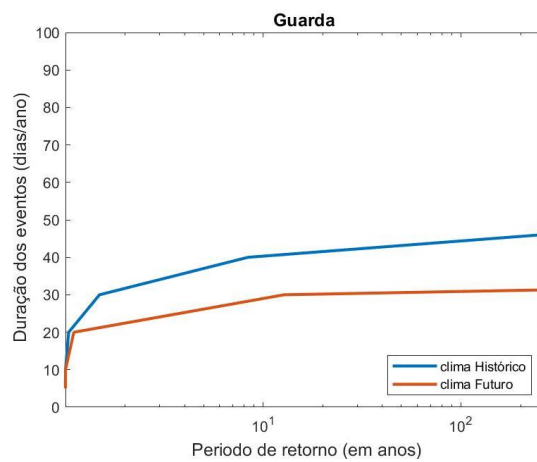
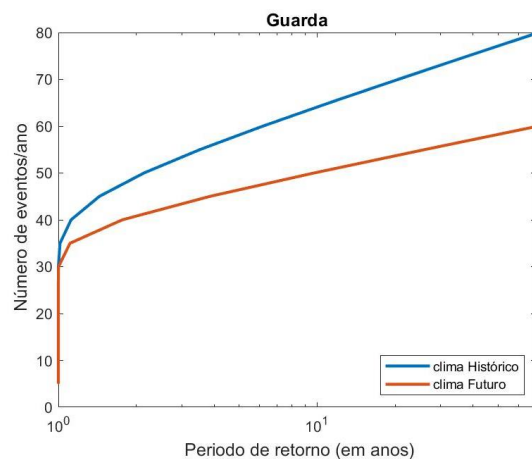
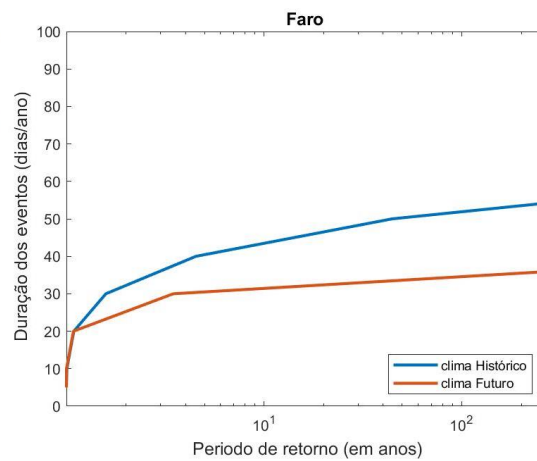
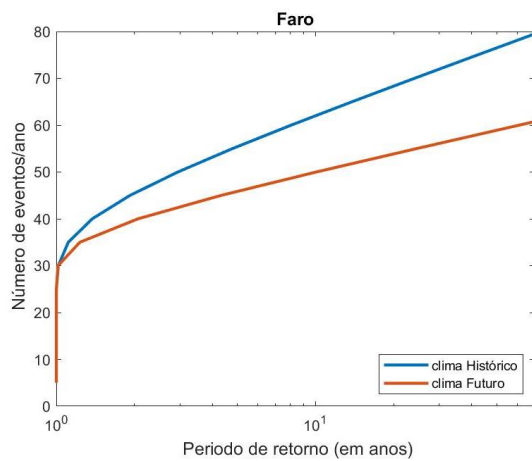


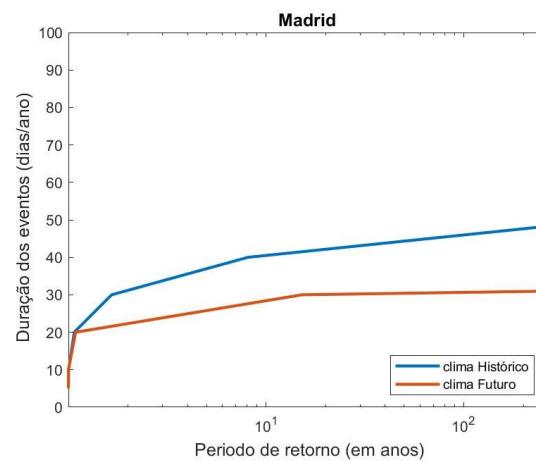
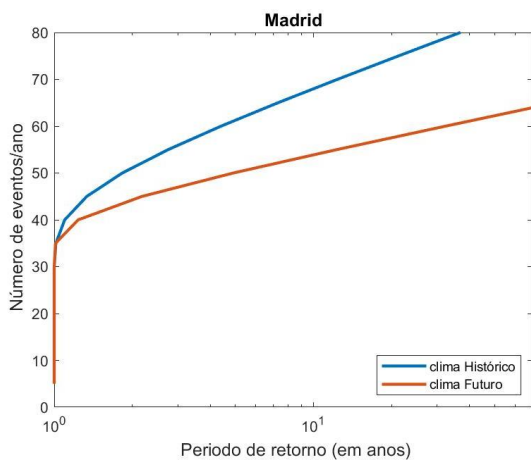
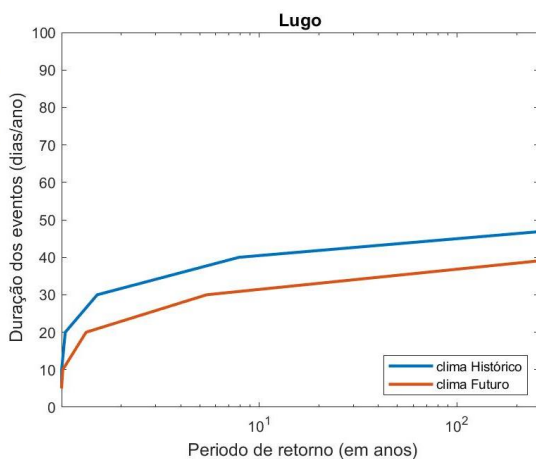
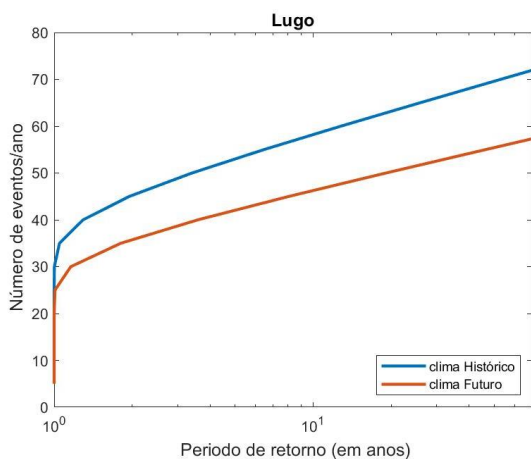
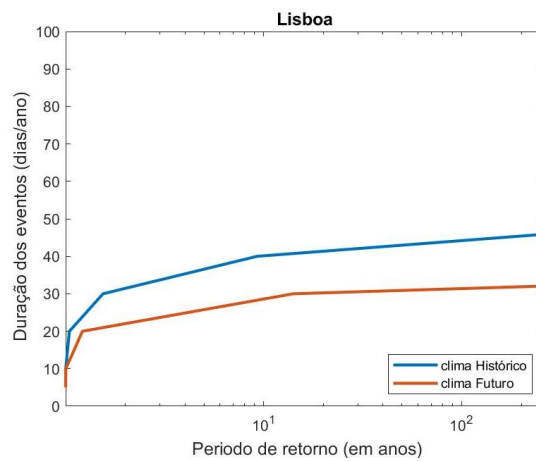
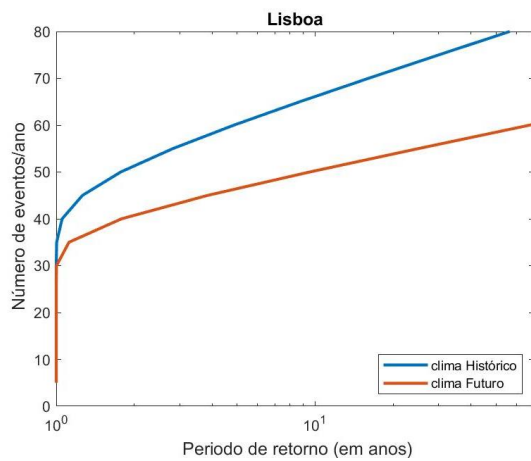
Figura A9 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a intensidade do ventos aos 850 hPa.

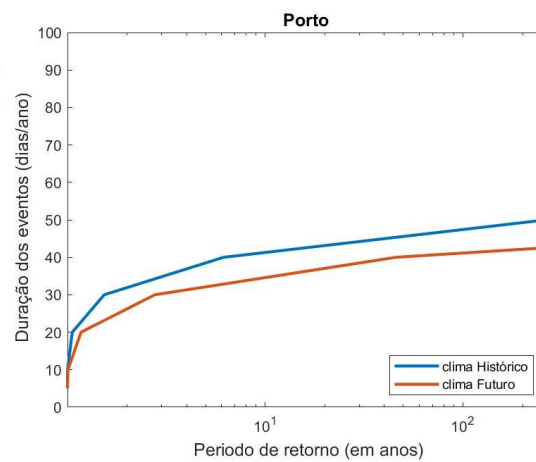
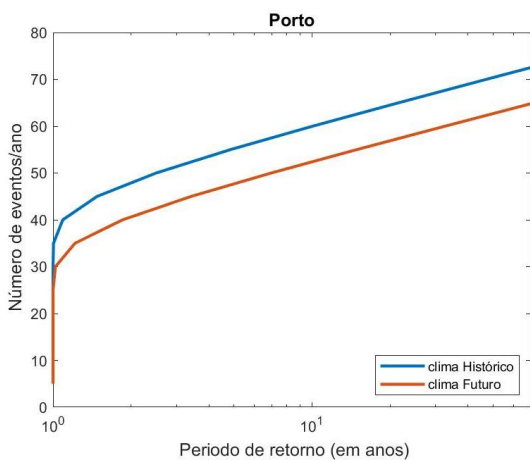
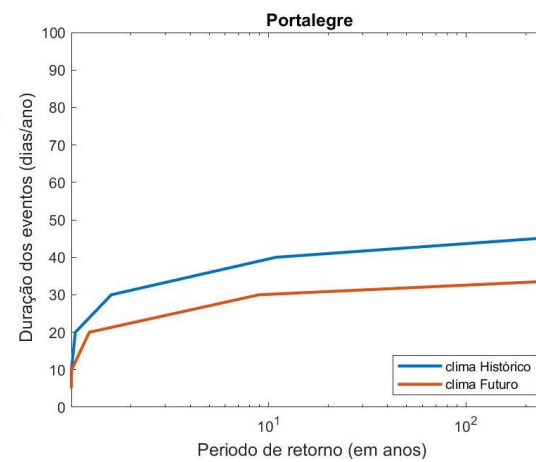
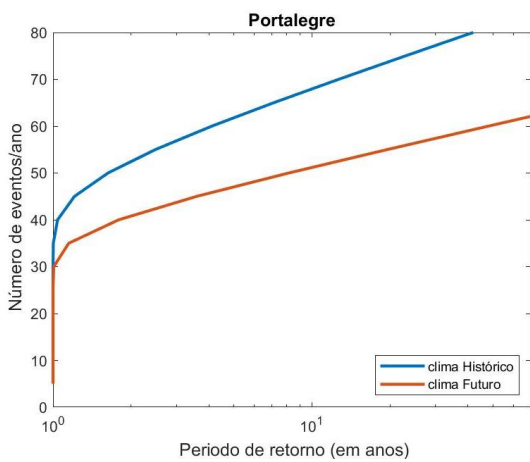
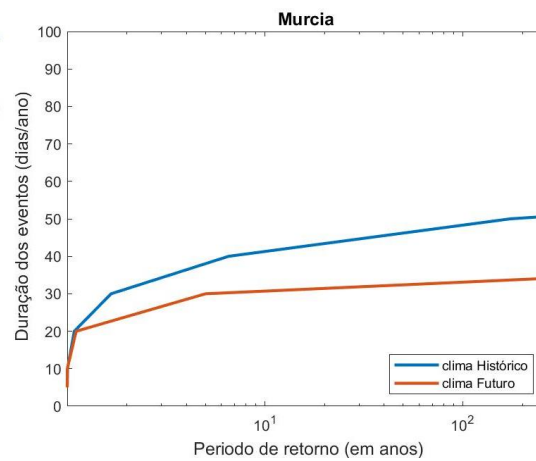
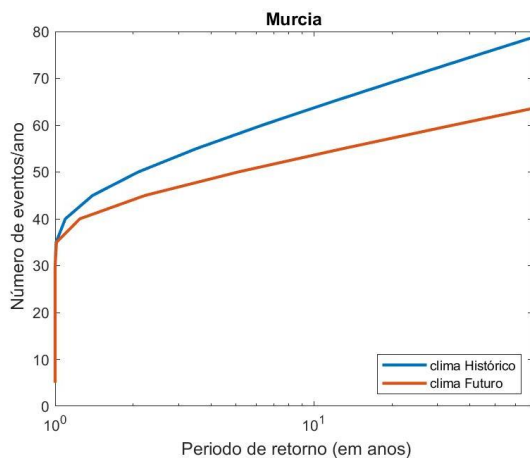


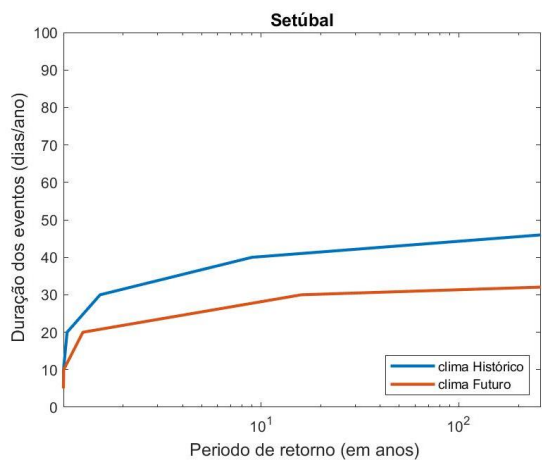
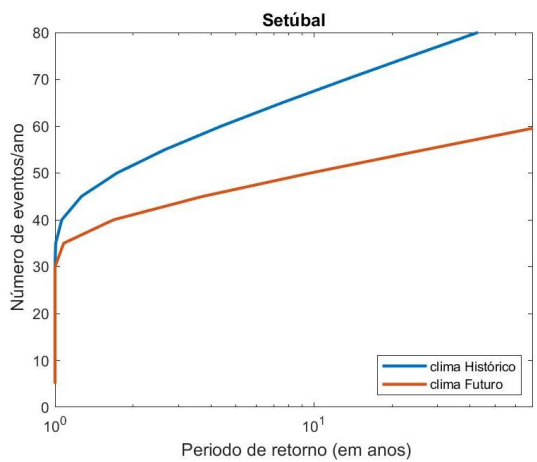
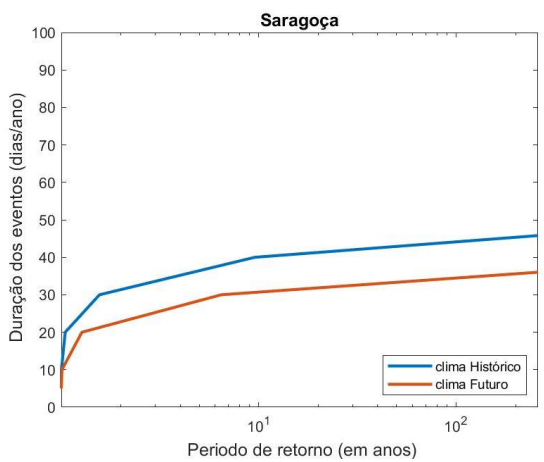
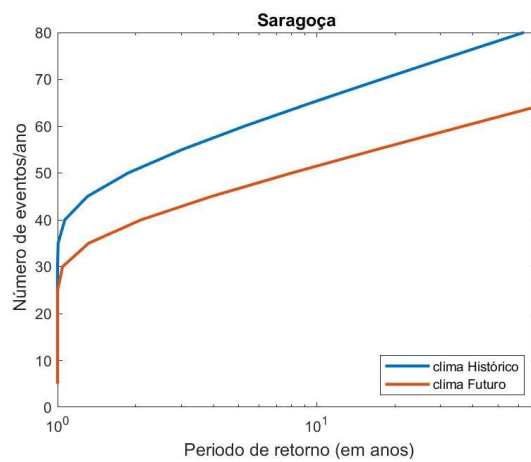
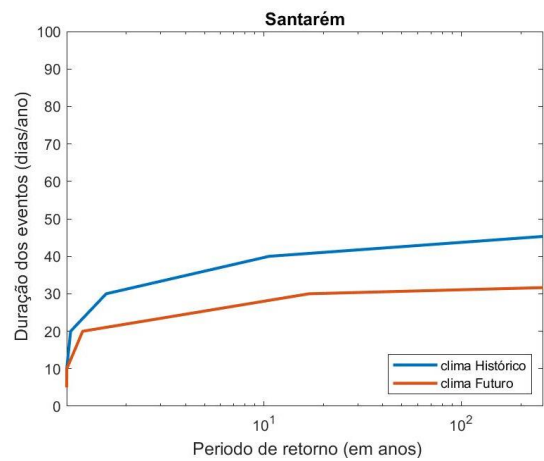
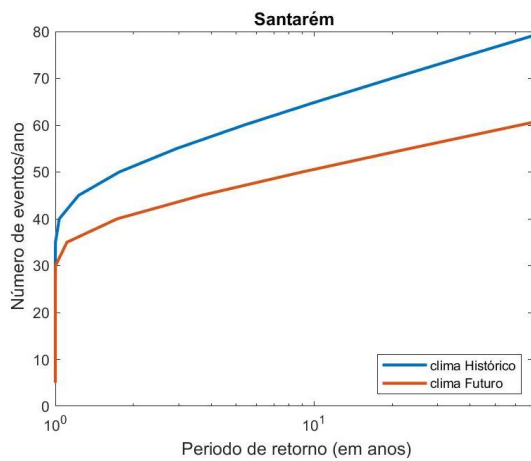


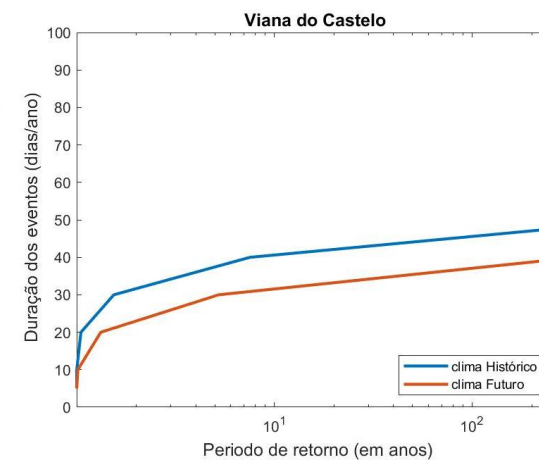
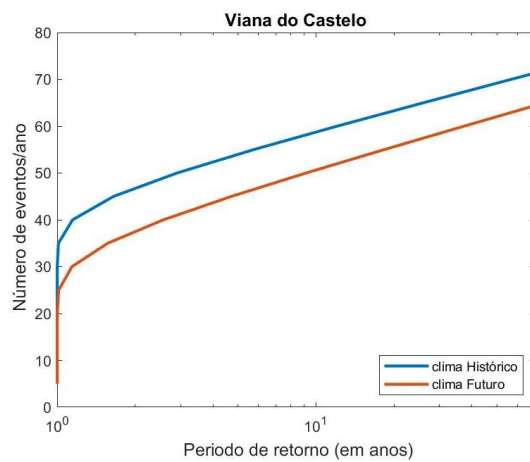
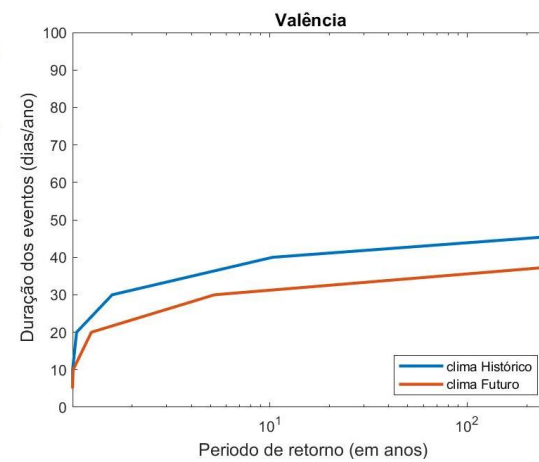
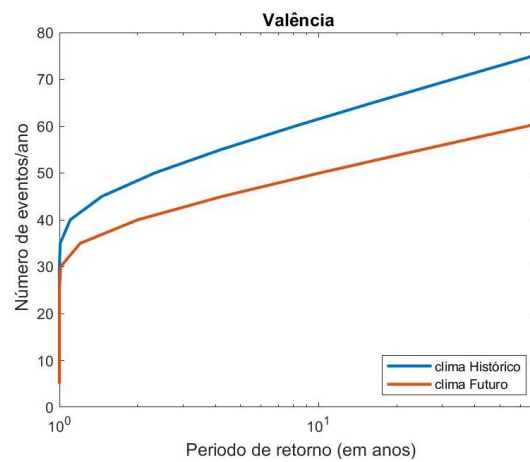
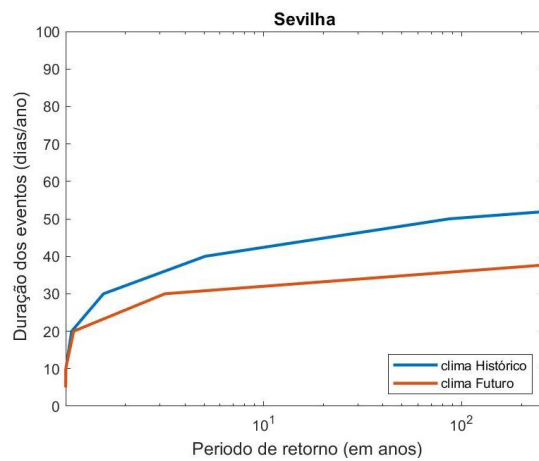
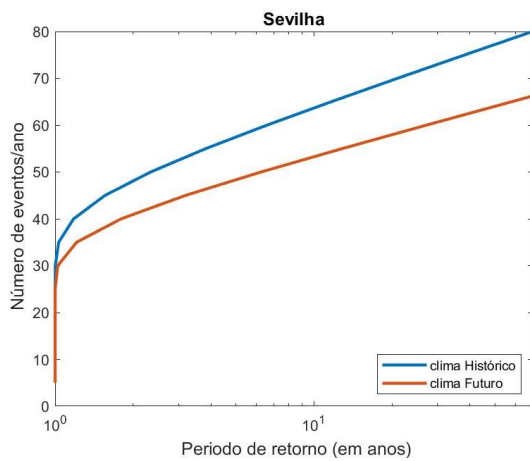












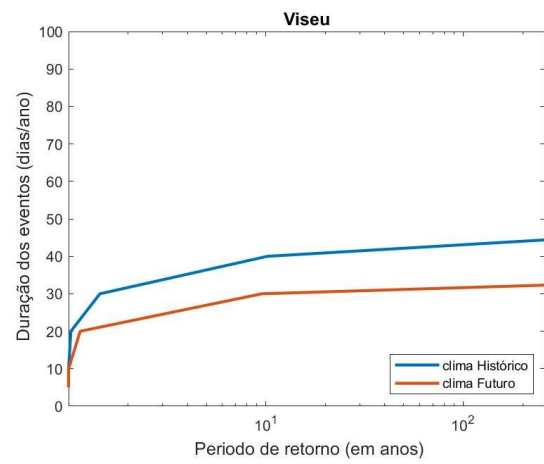
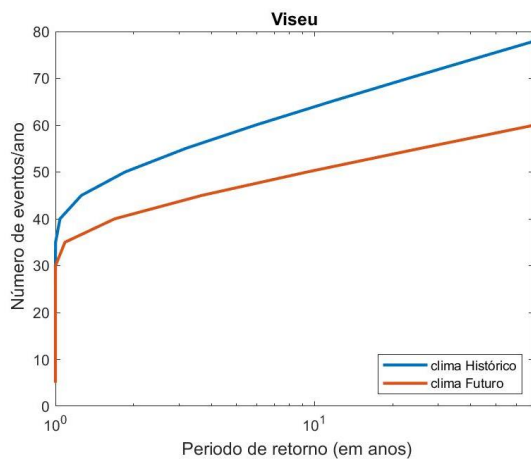
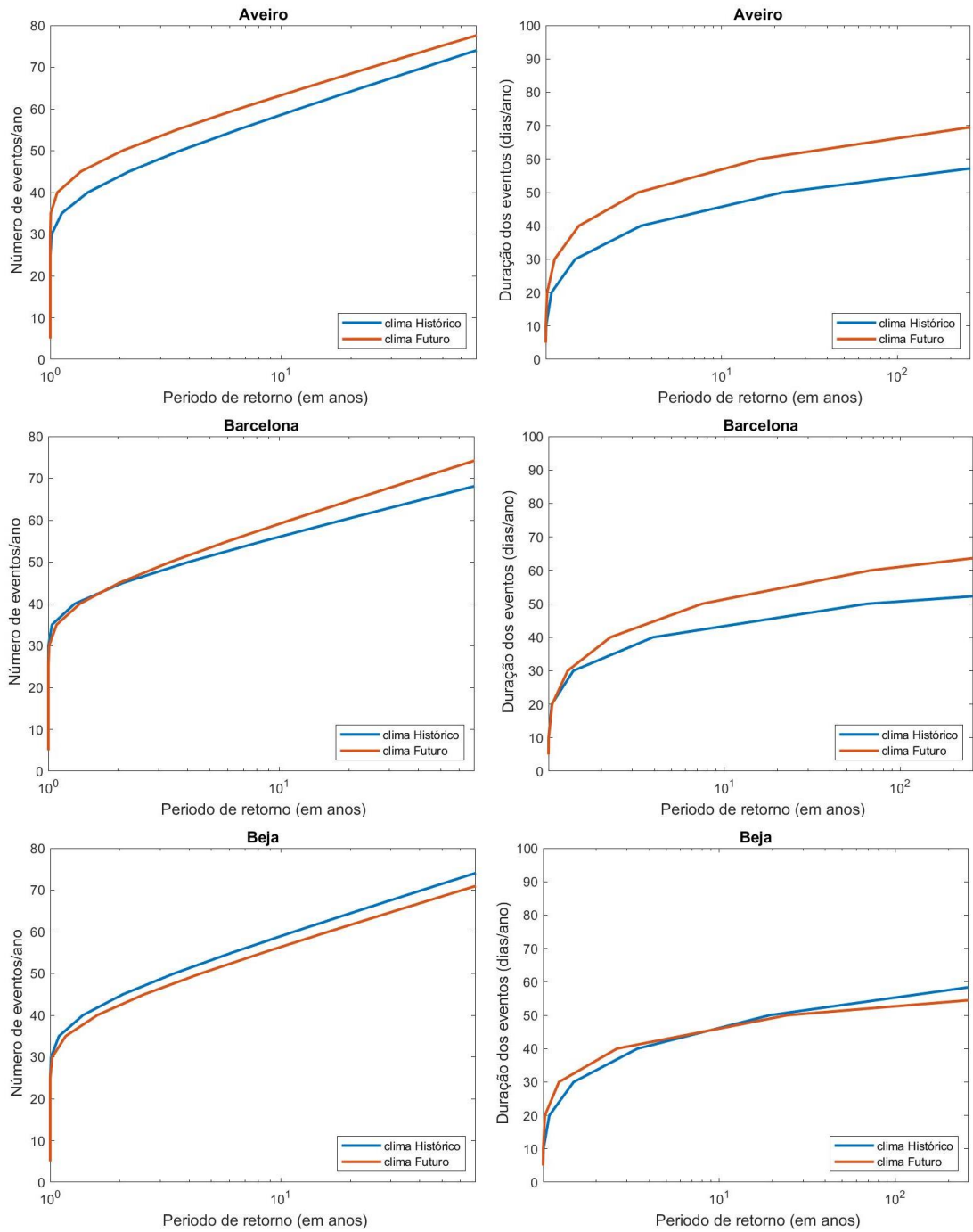
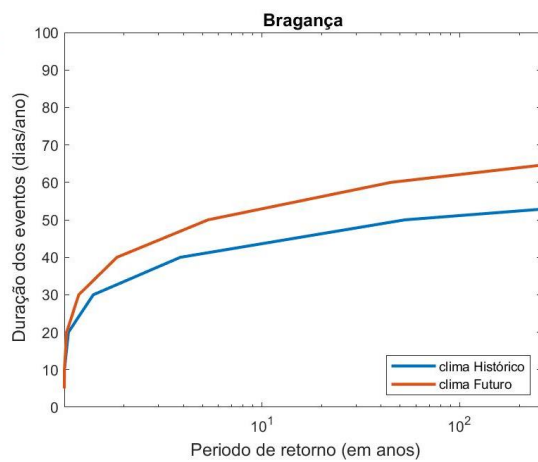
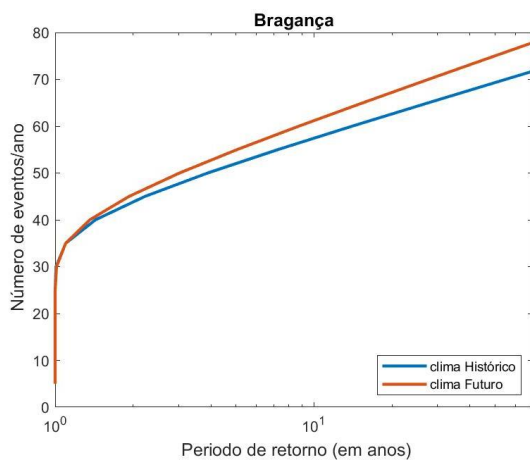
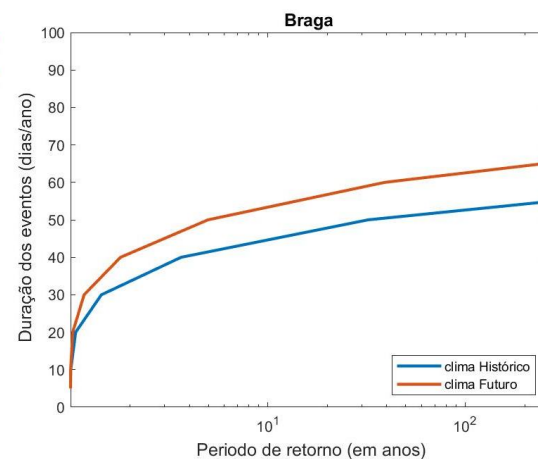
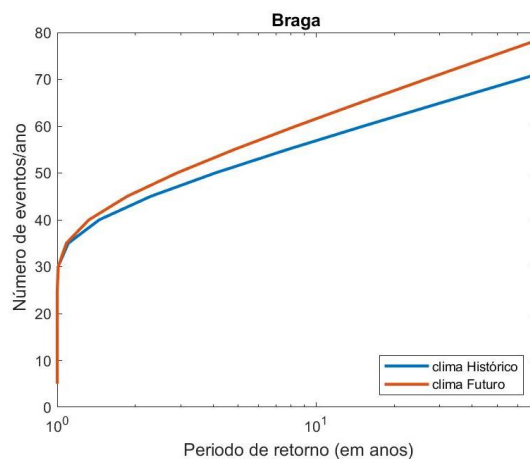
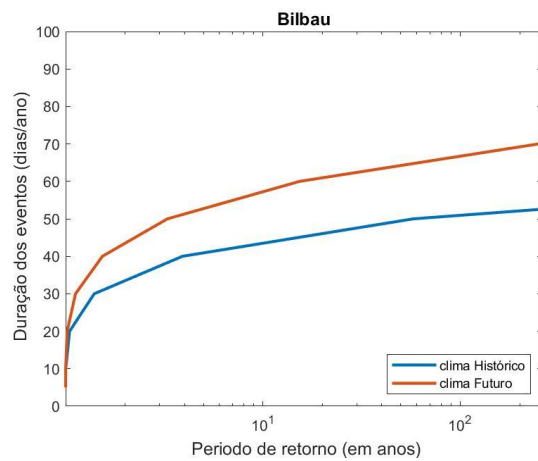
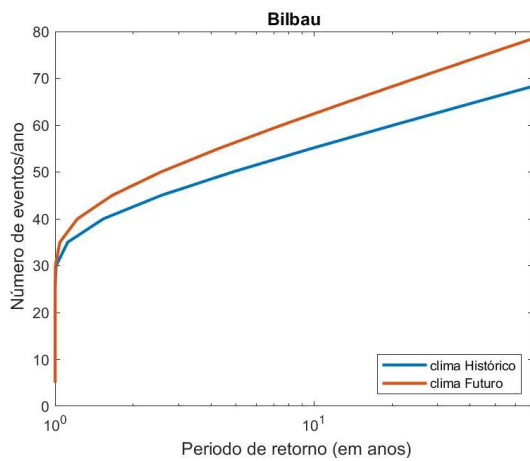
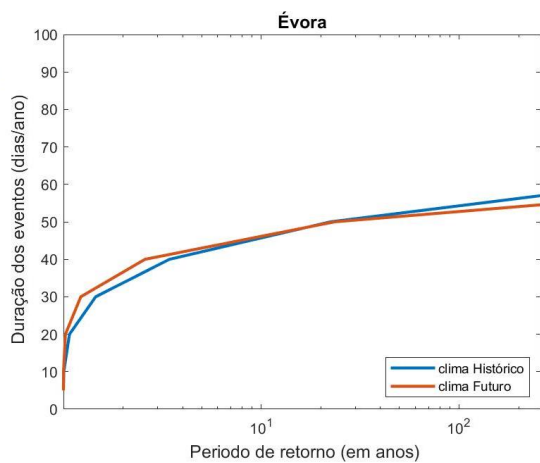
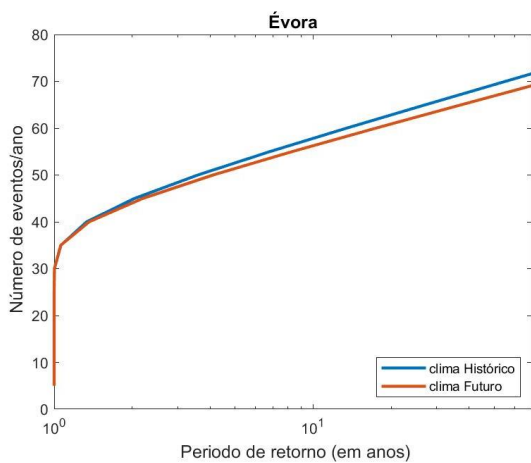
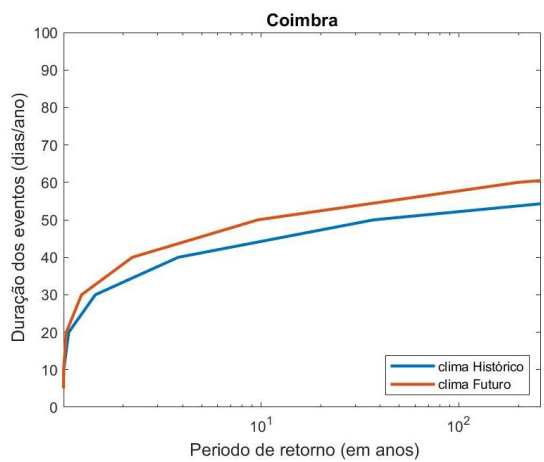
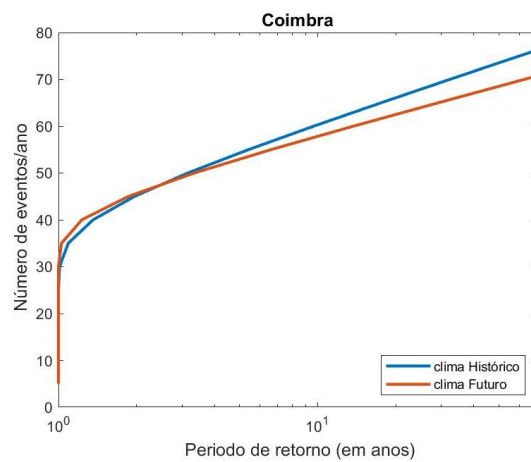
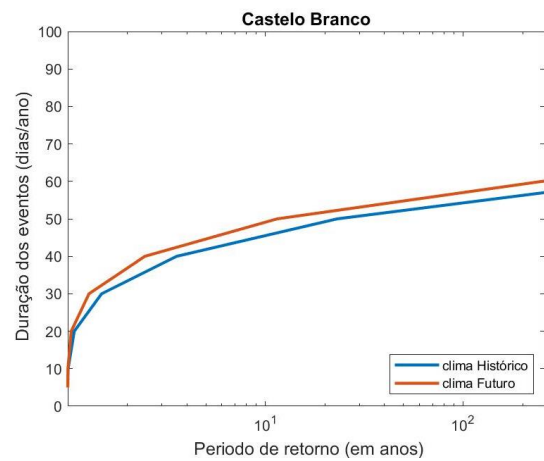
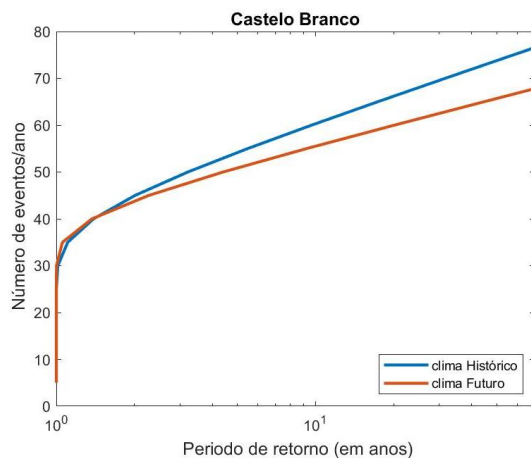
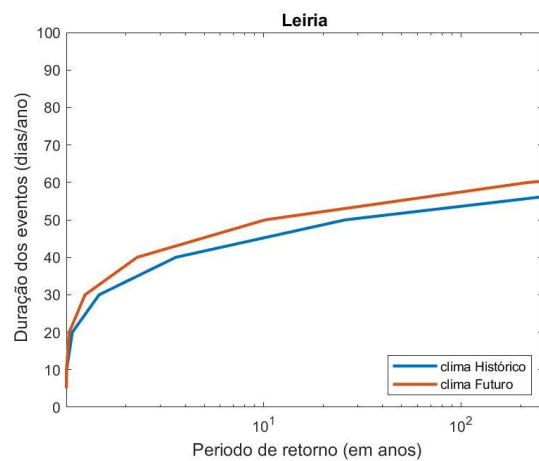
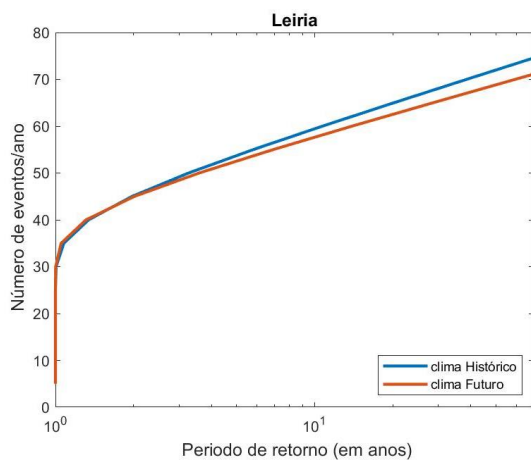
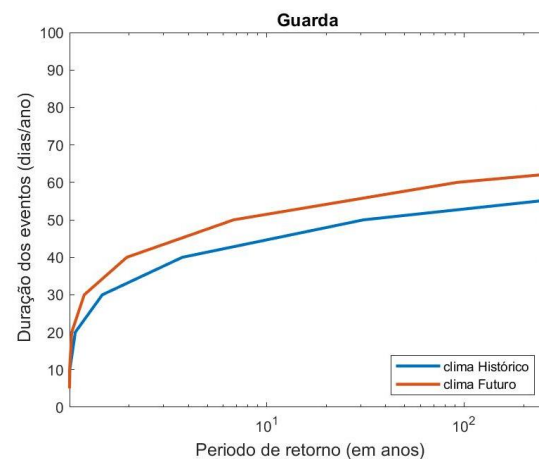
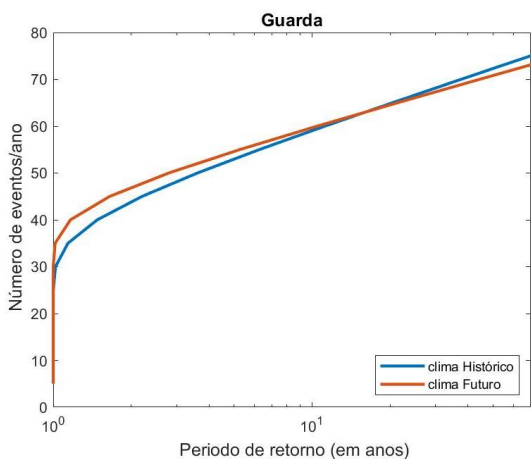
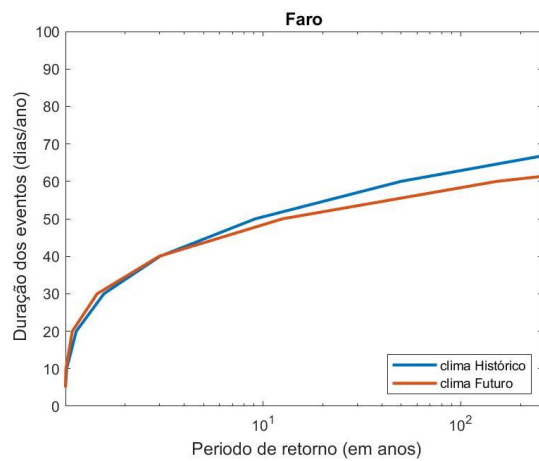
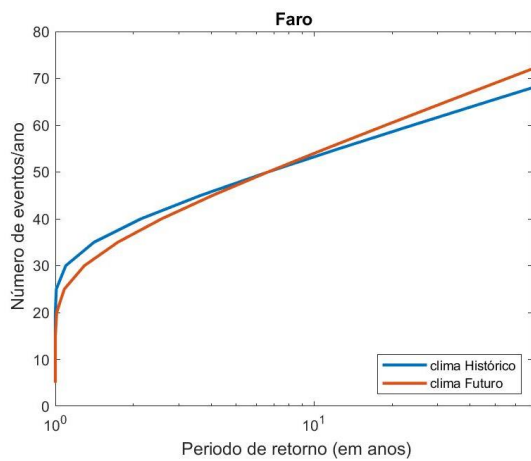


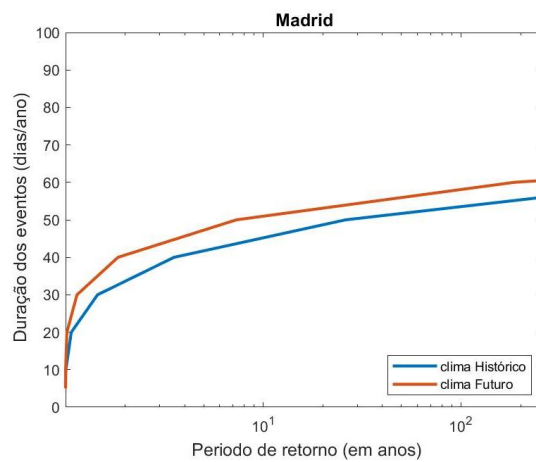
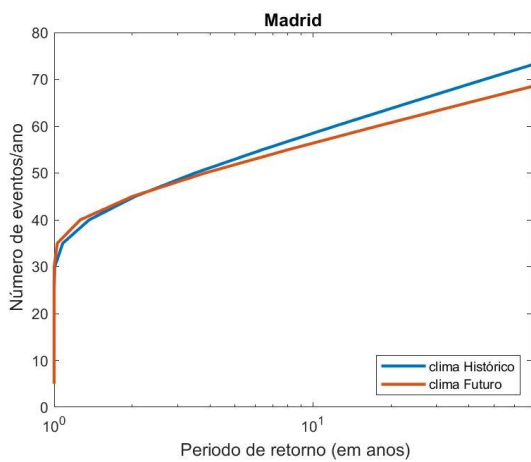
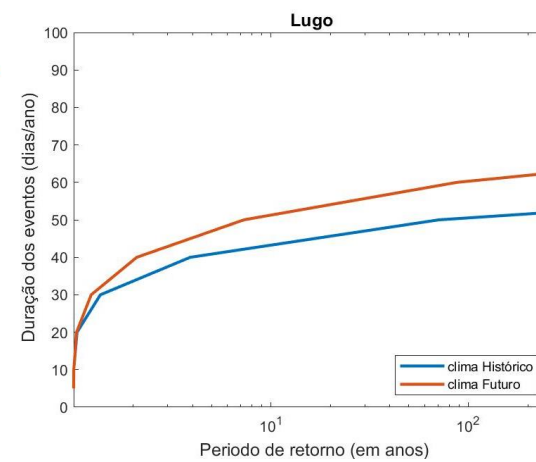
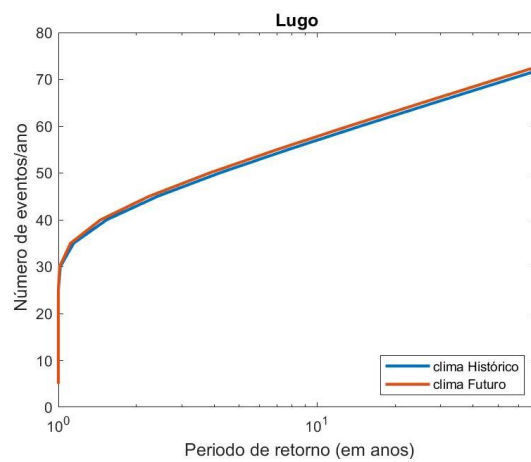
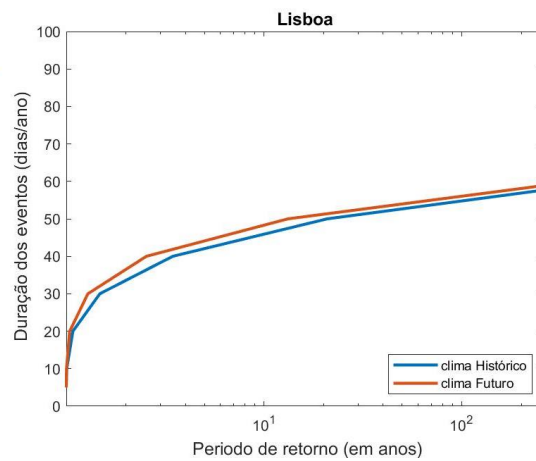
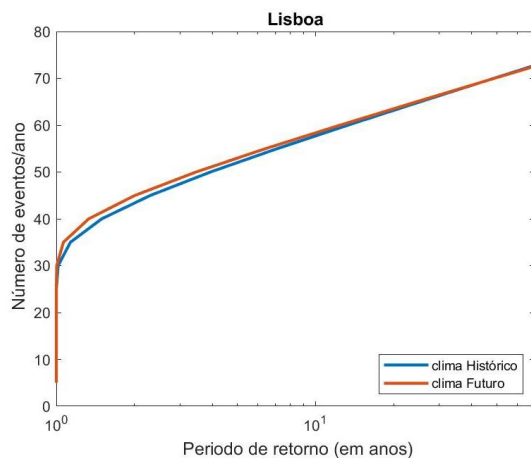
Figura A10 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a intensidade do ventos aos 300 hPa.

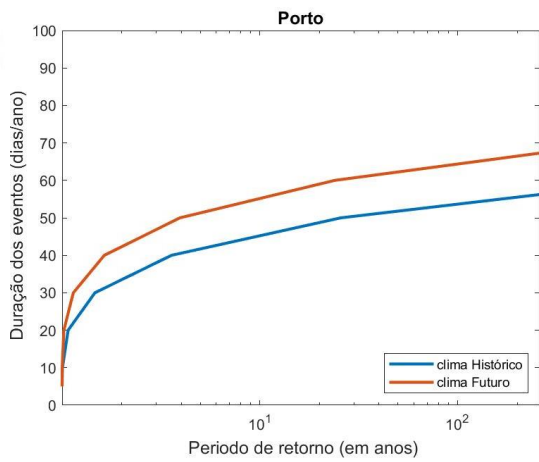
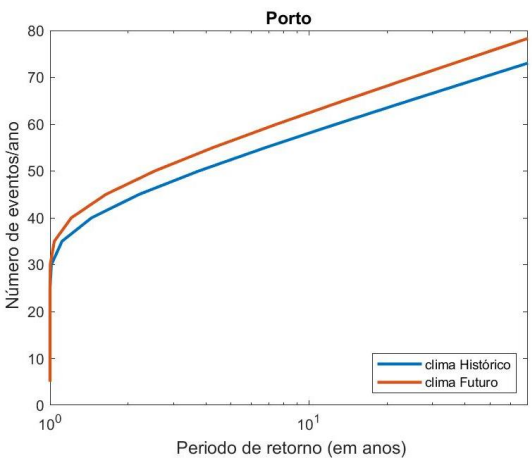
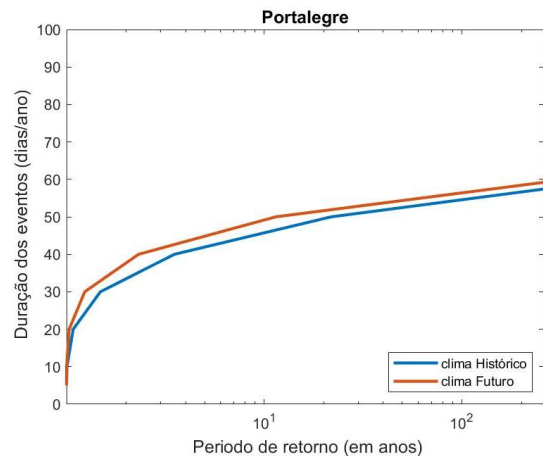
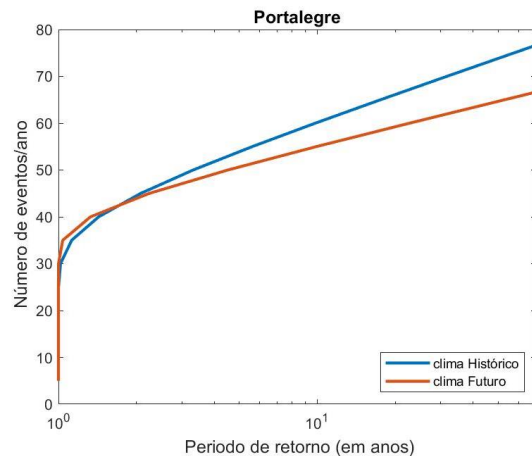
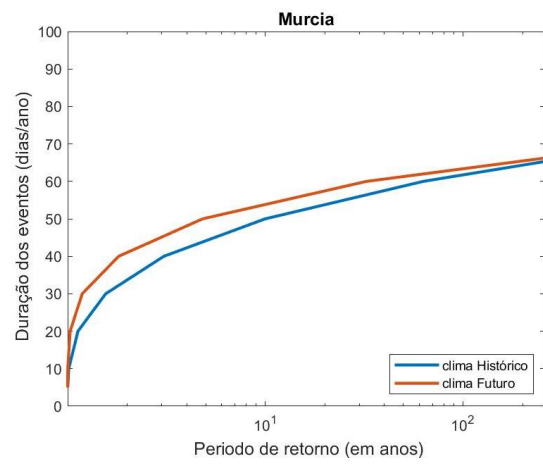
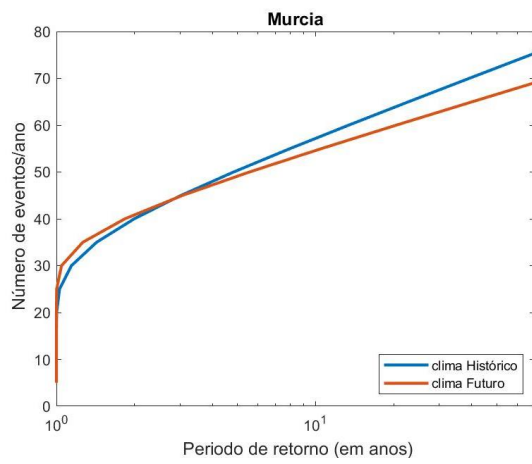


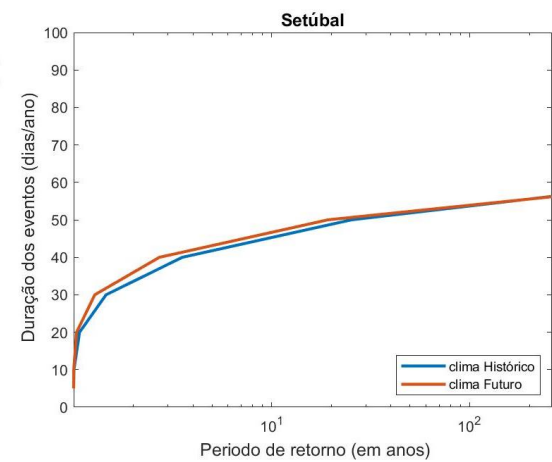
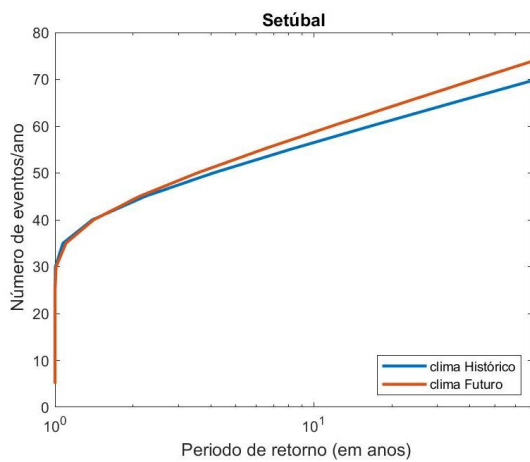
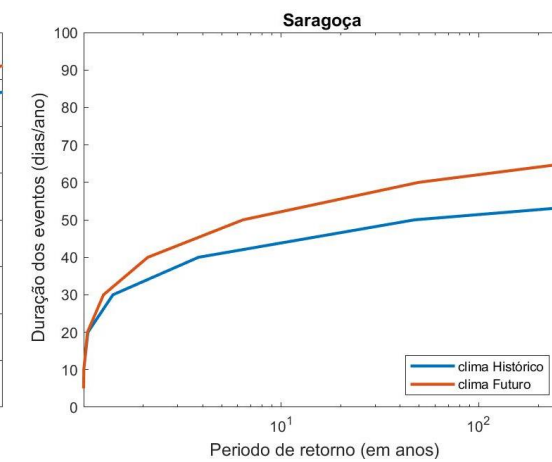
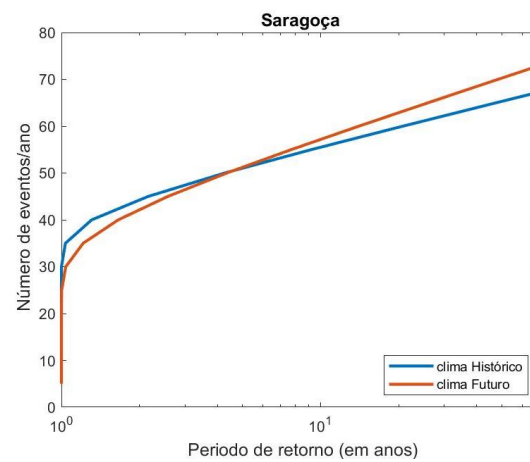
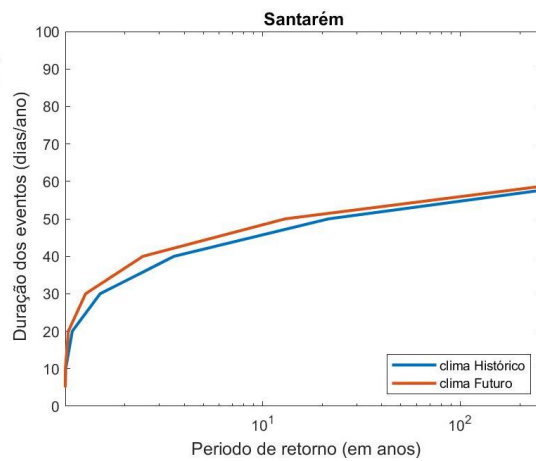
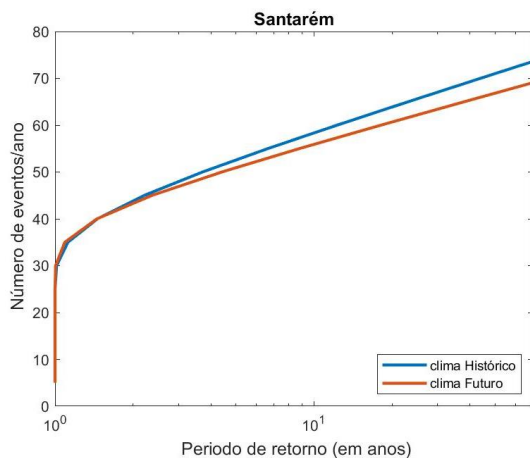


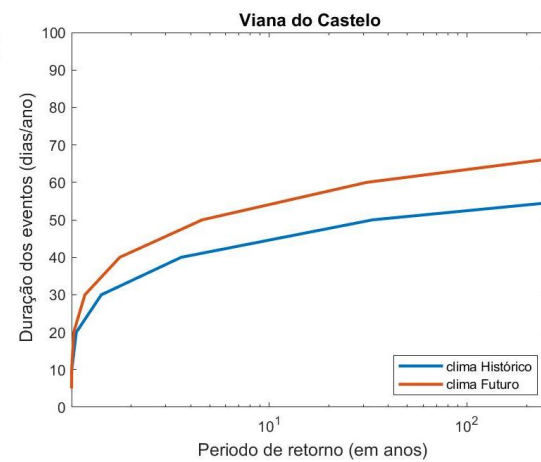
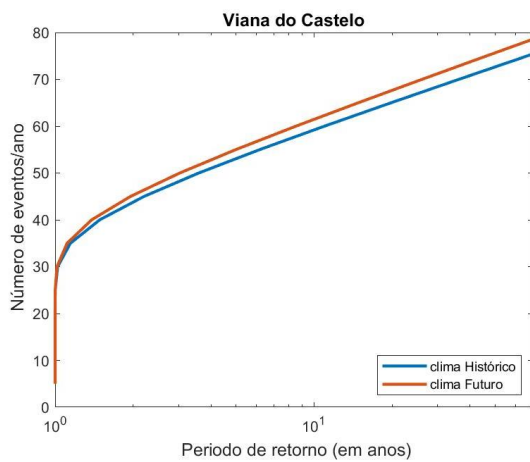
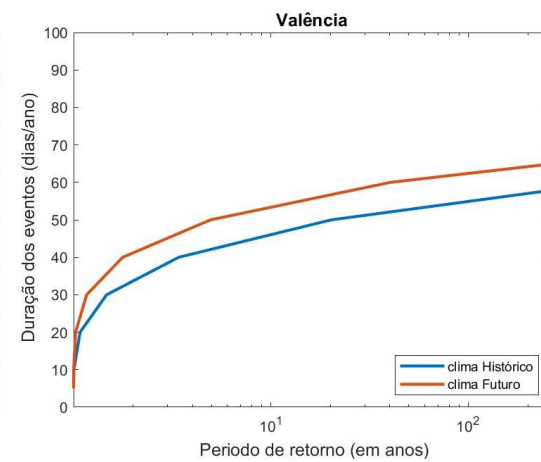
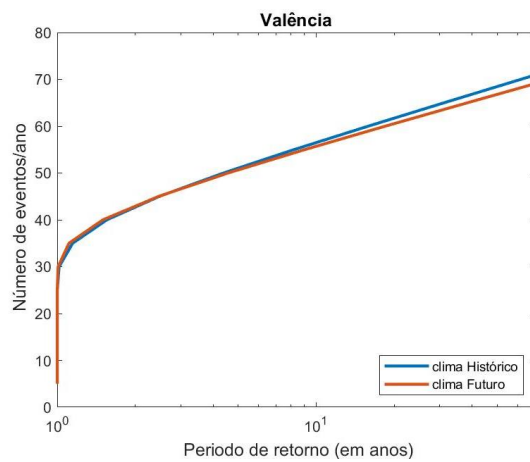
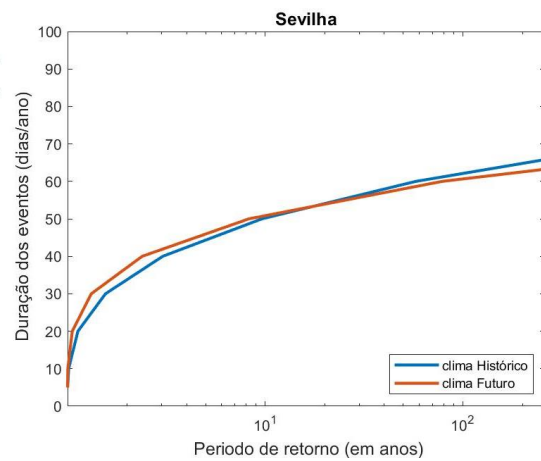
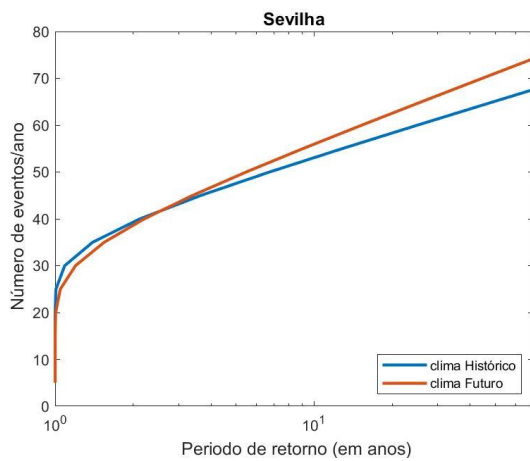












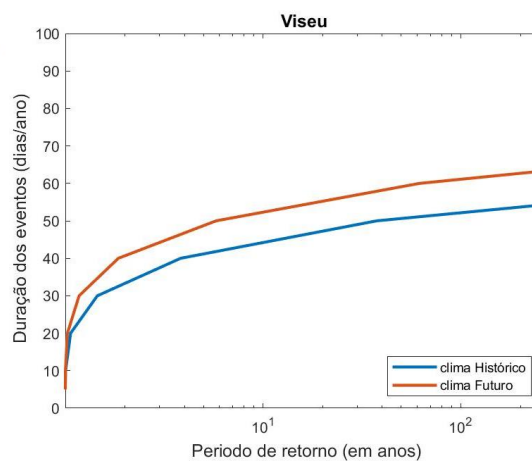
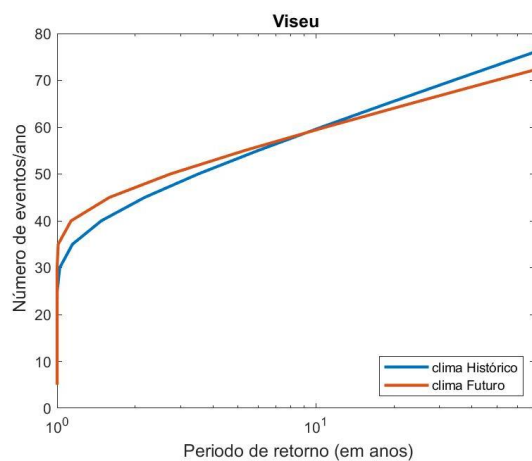
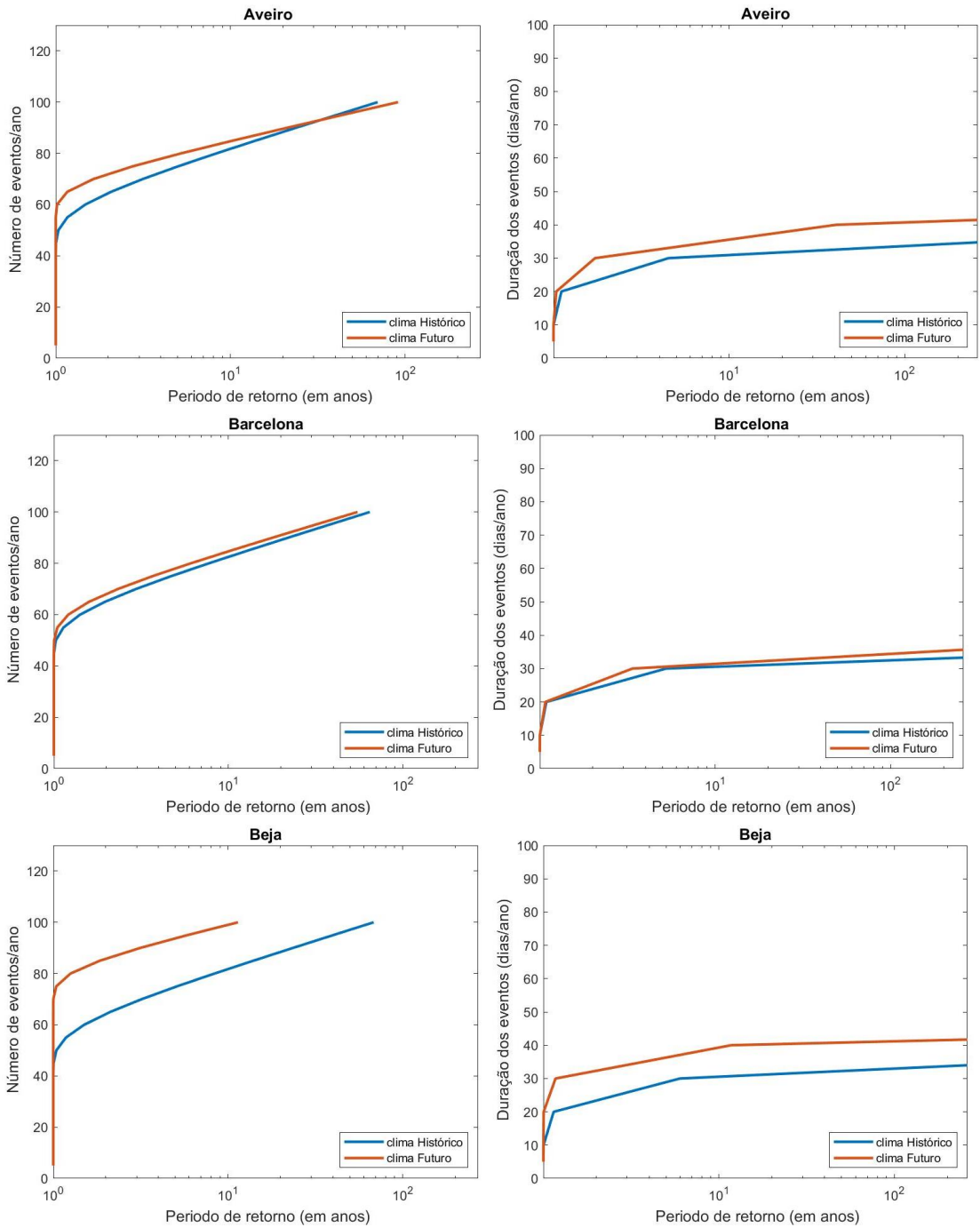
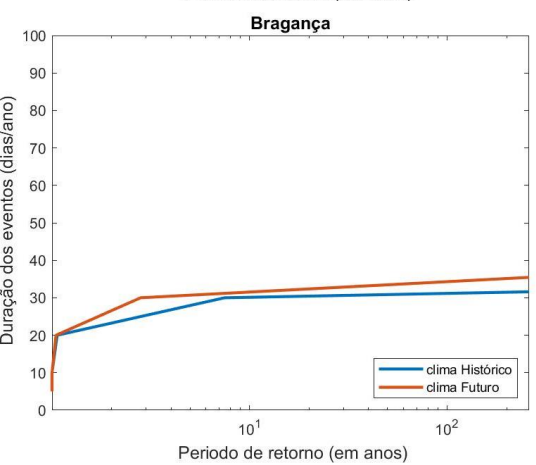
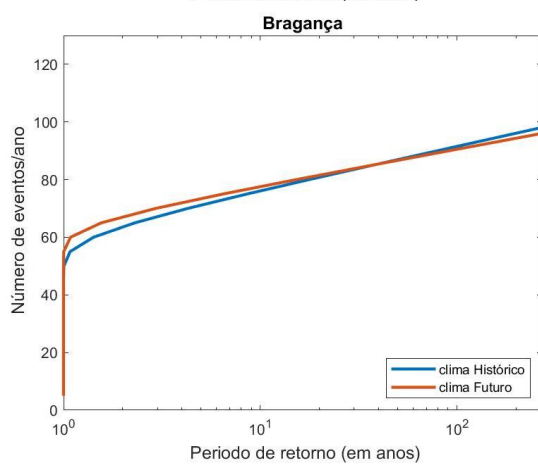
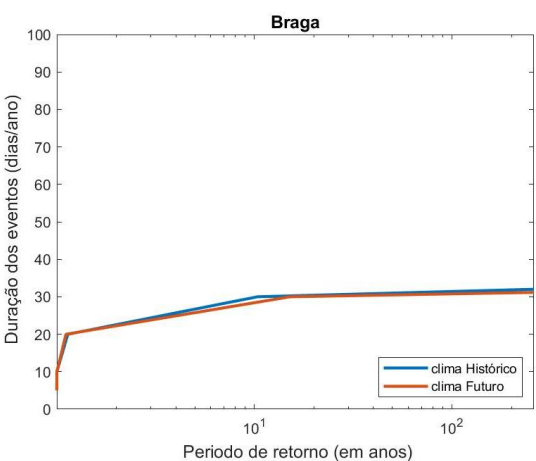
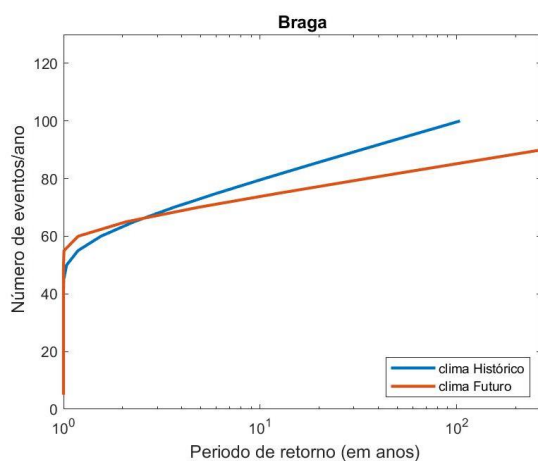
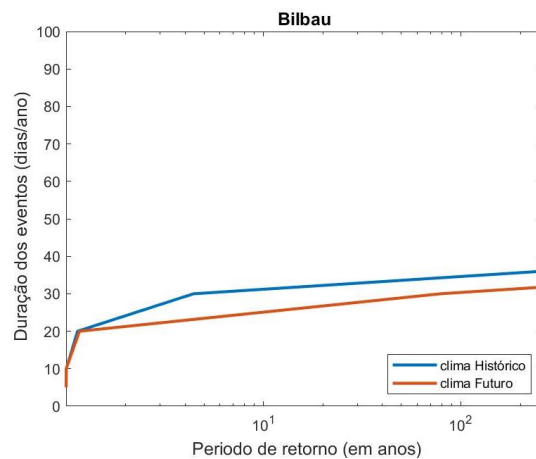
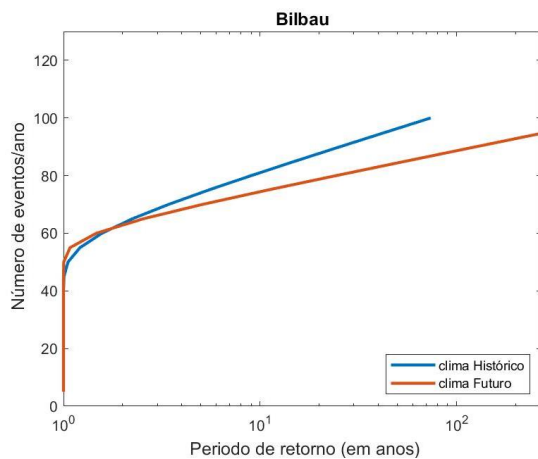
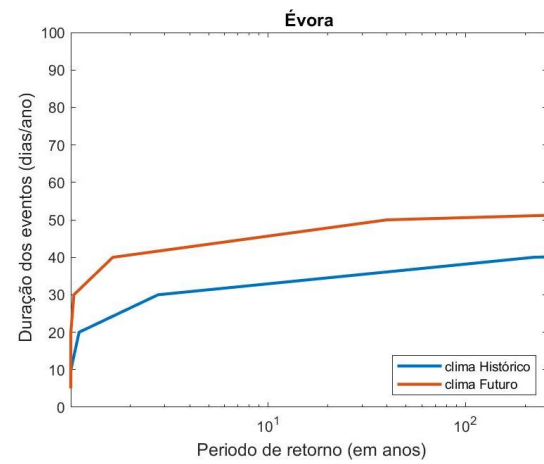
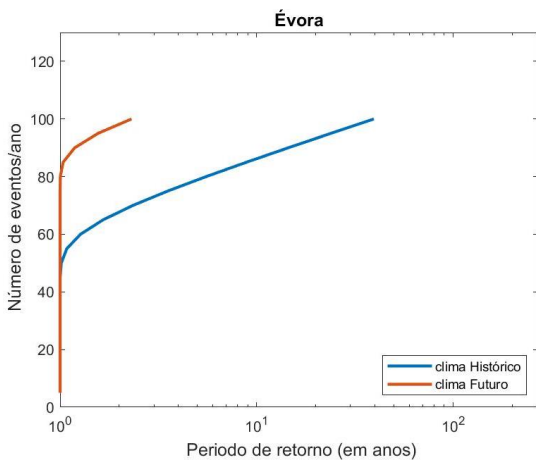
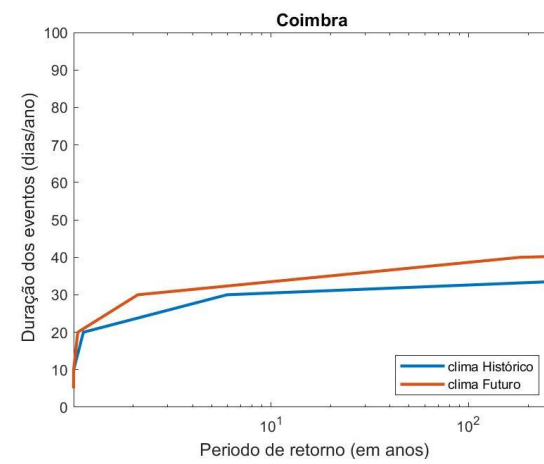
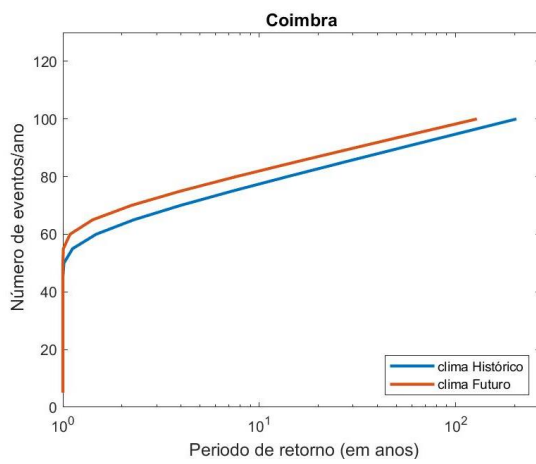
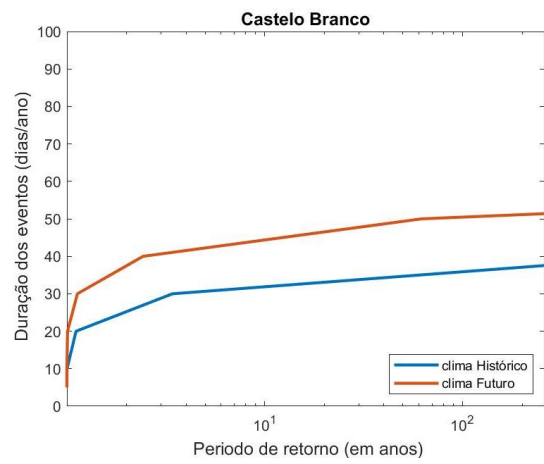
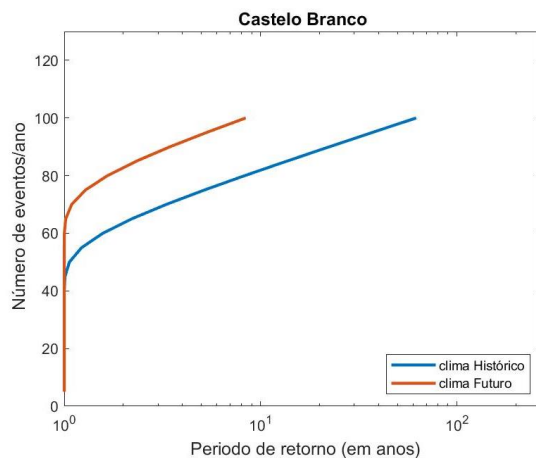
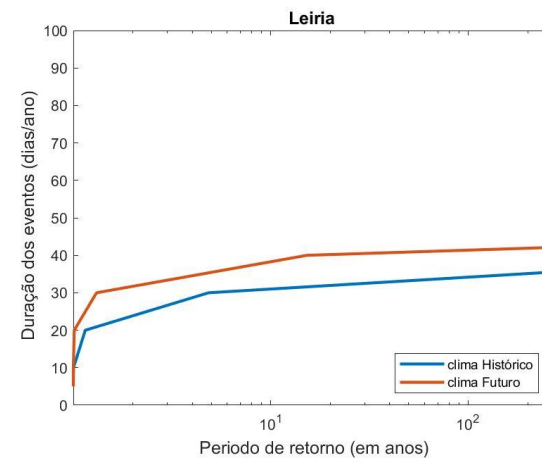
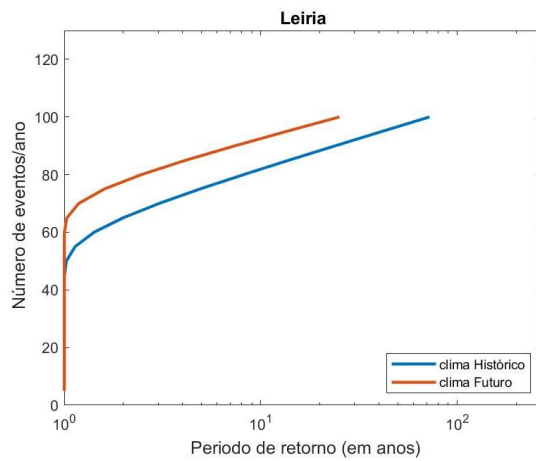
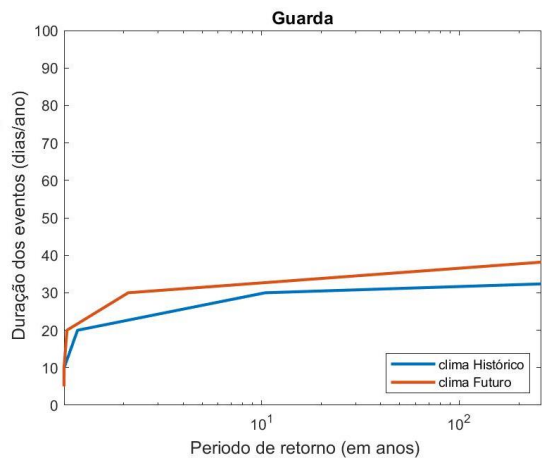
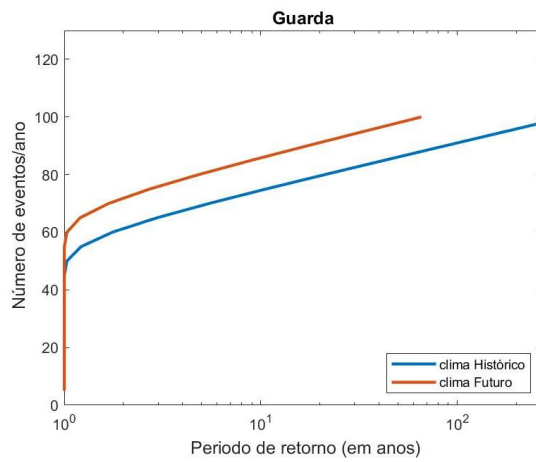
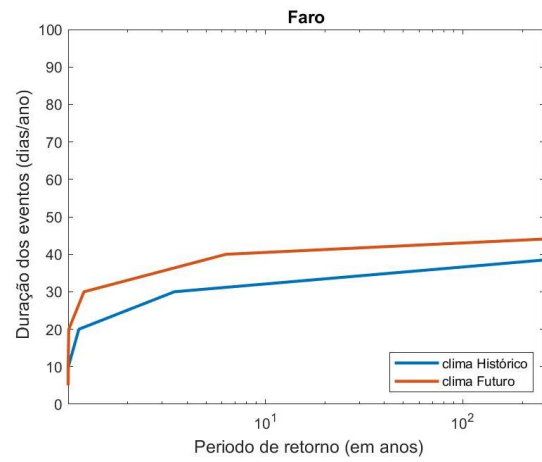
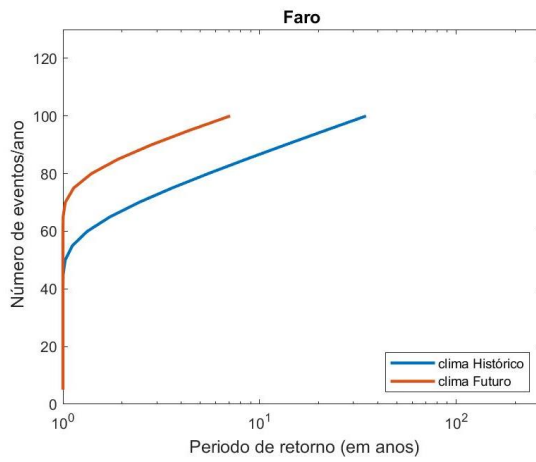


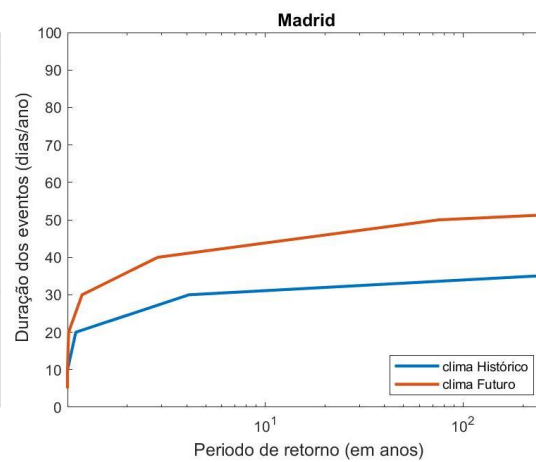
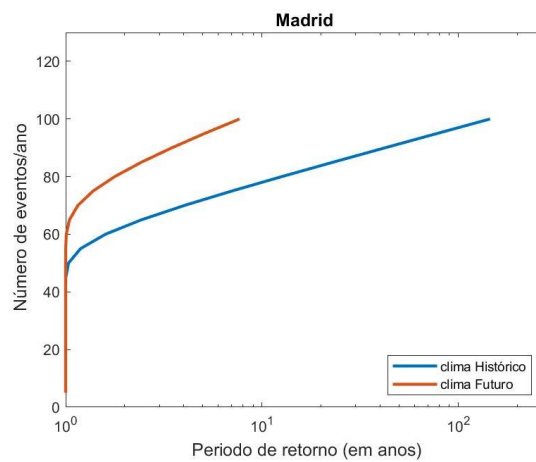
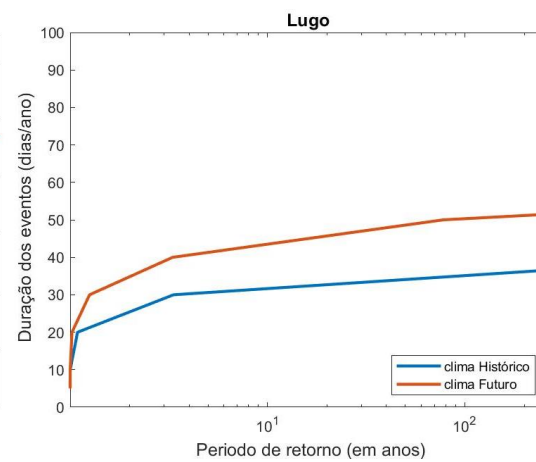
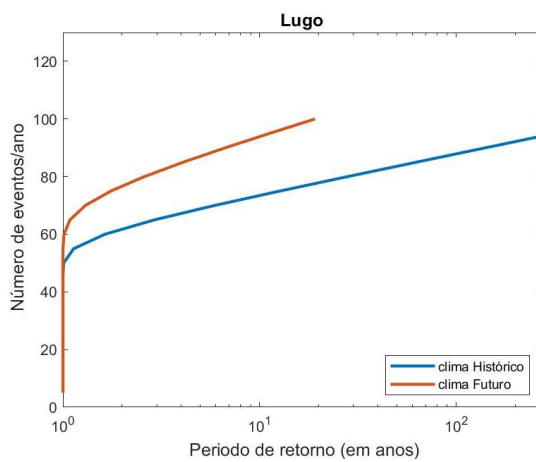
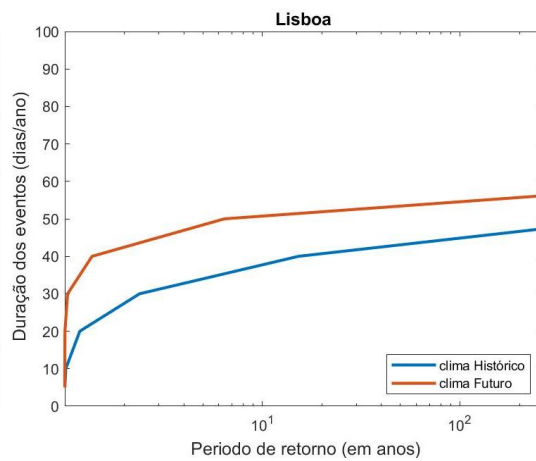
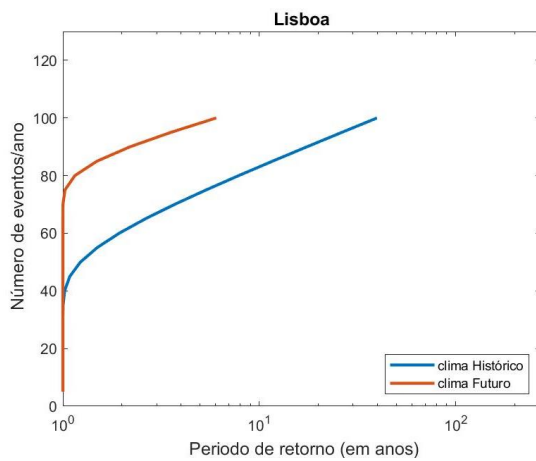
Figura A11 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a intensidade do vento de corte dos 0 aos 6 km.

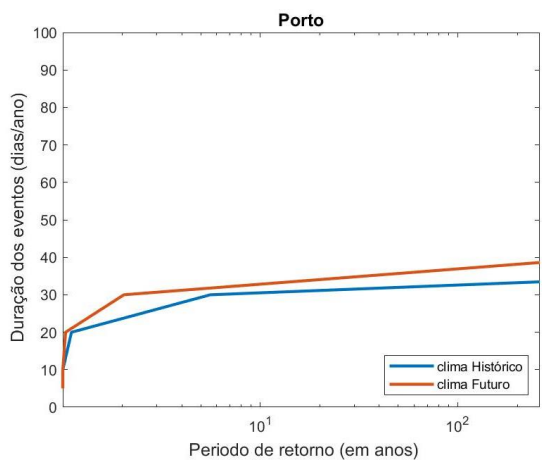
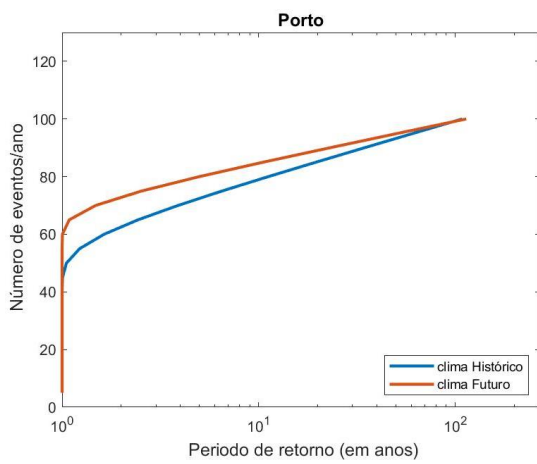
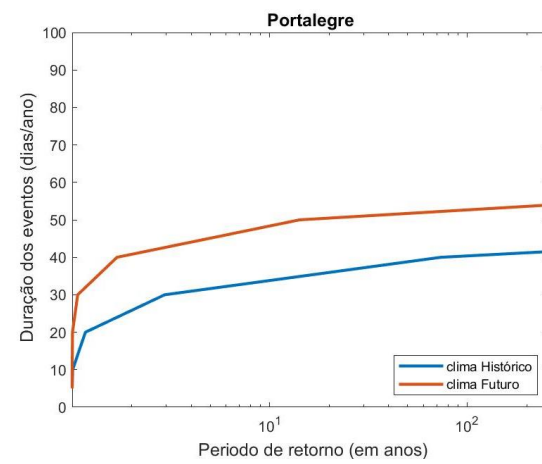
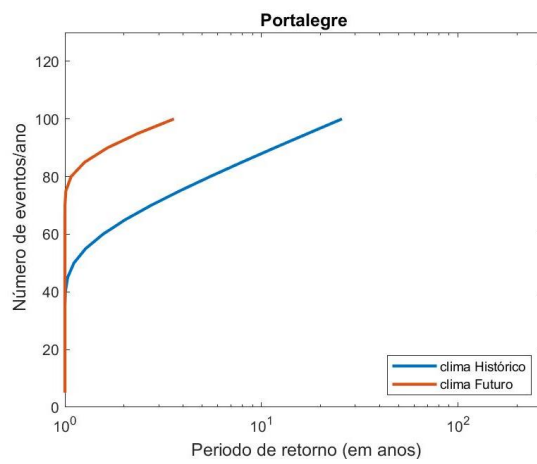
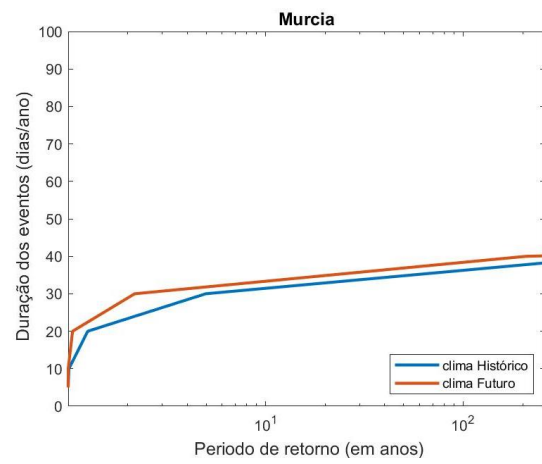
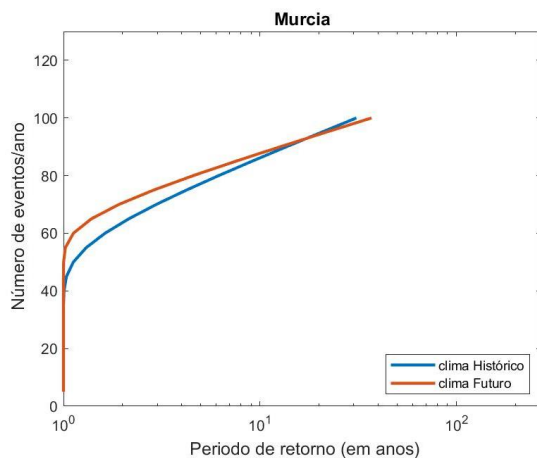


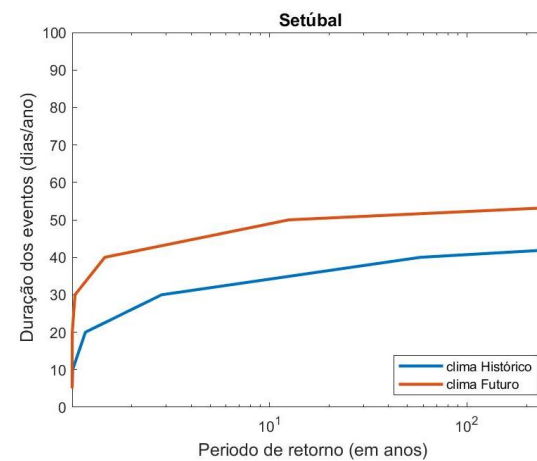
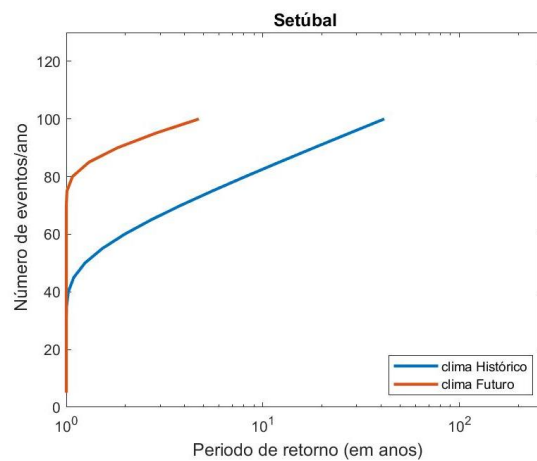
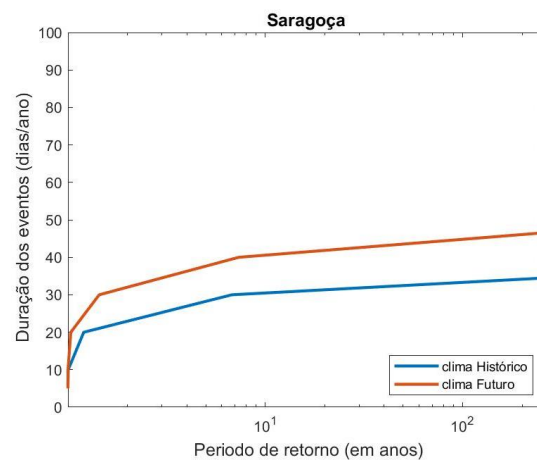
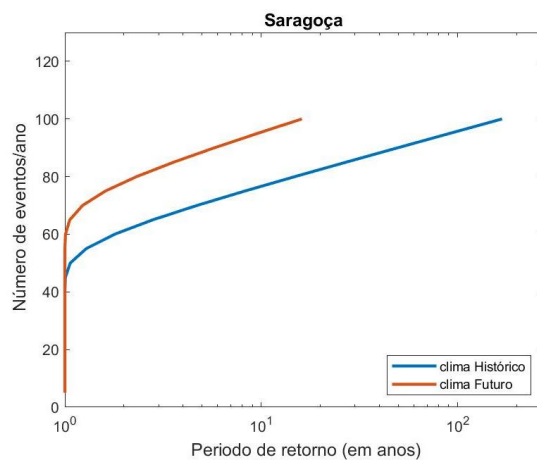
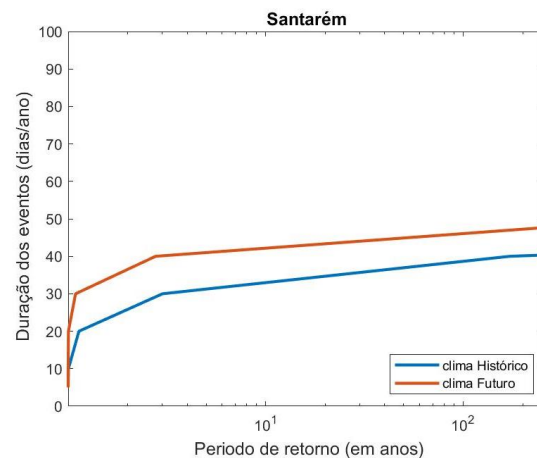
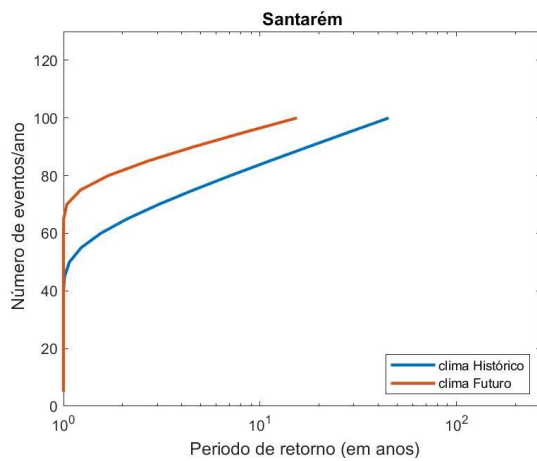


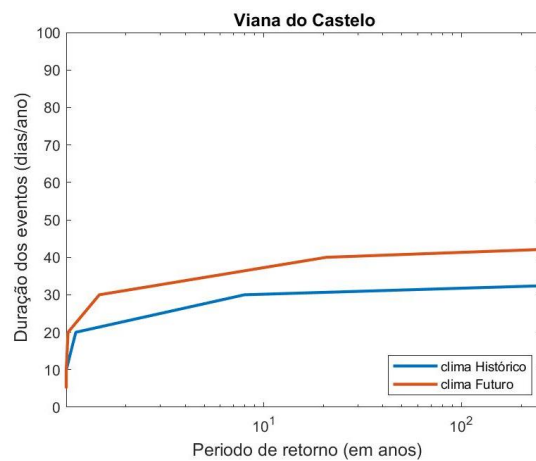
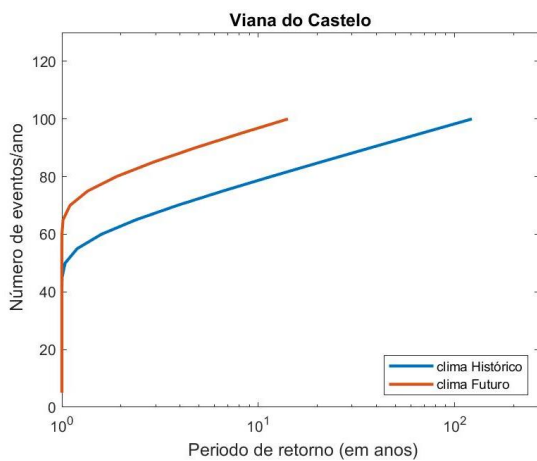
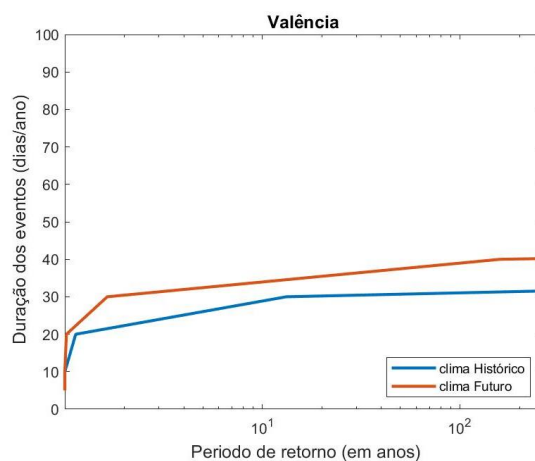
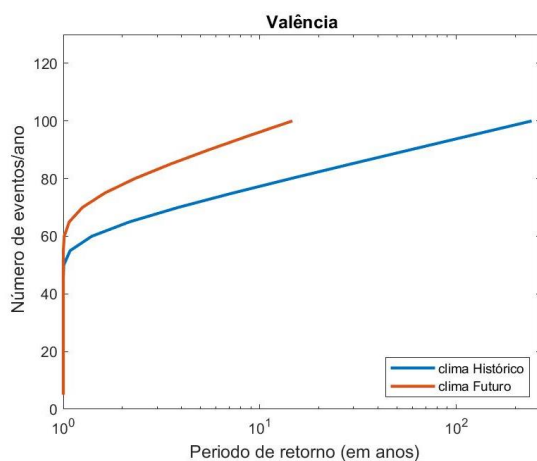
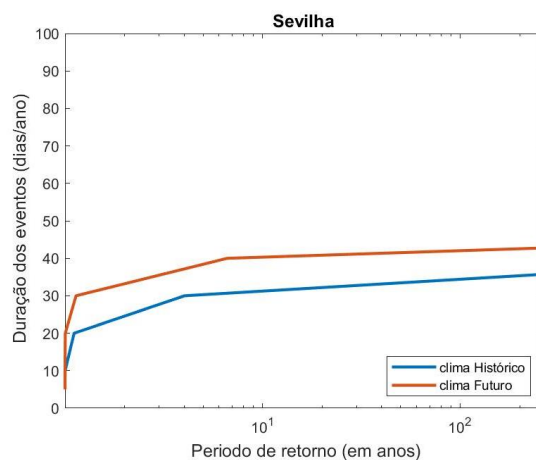
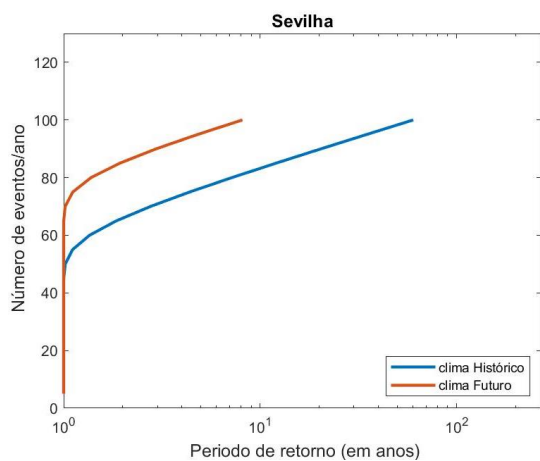












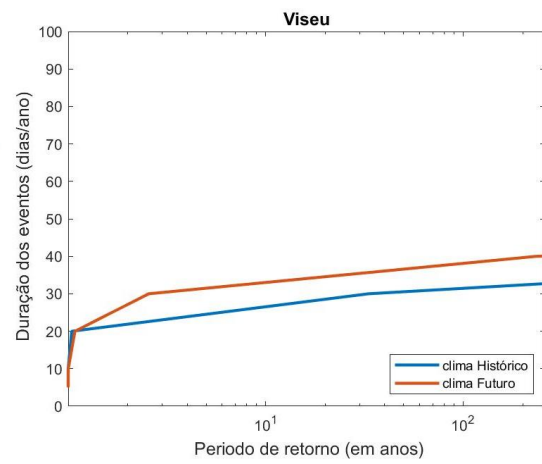
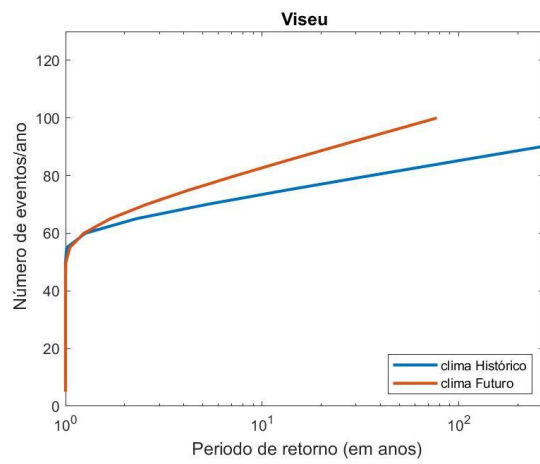
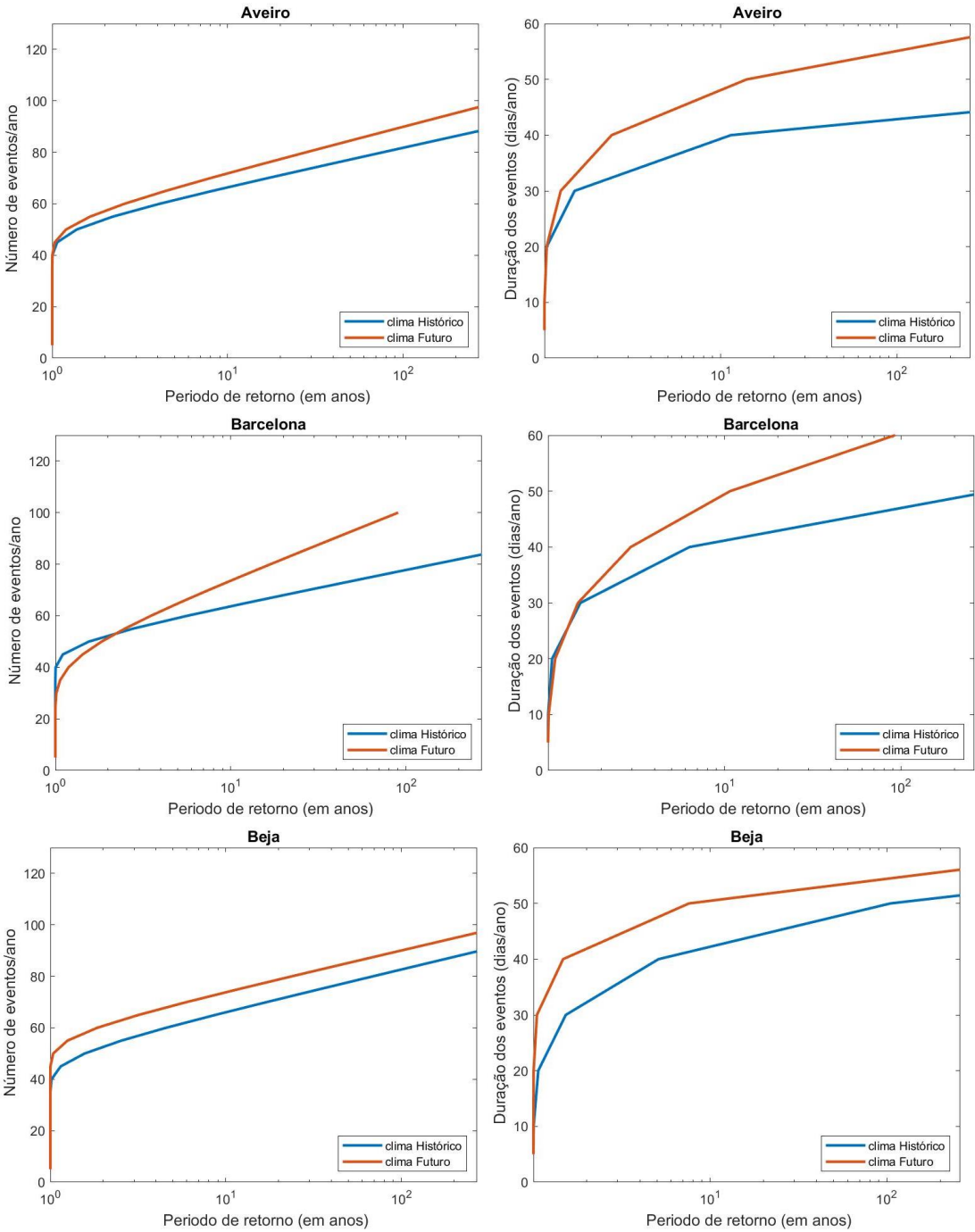
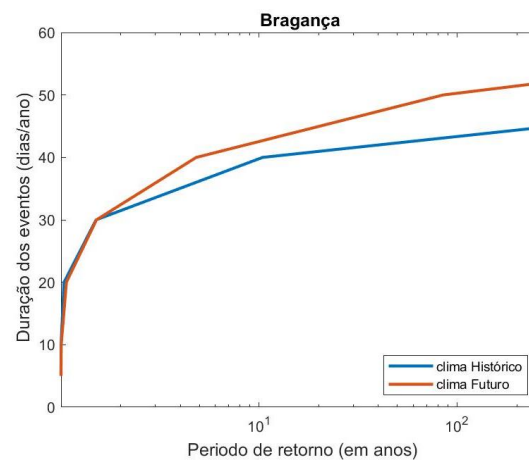
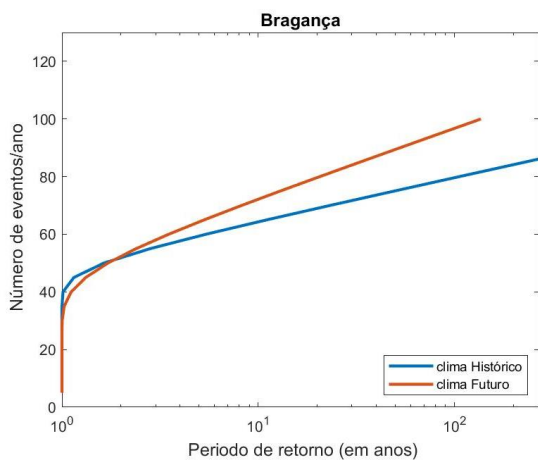
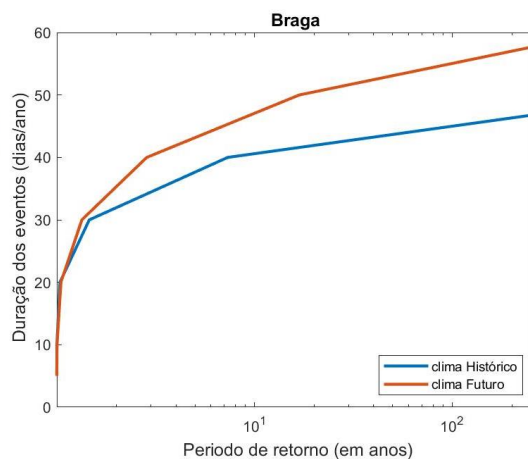
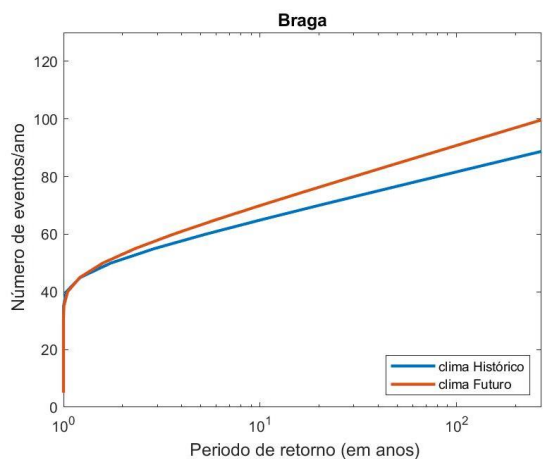
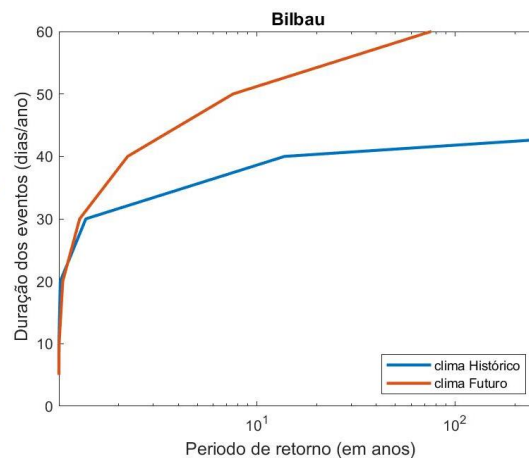
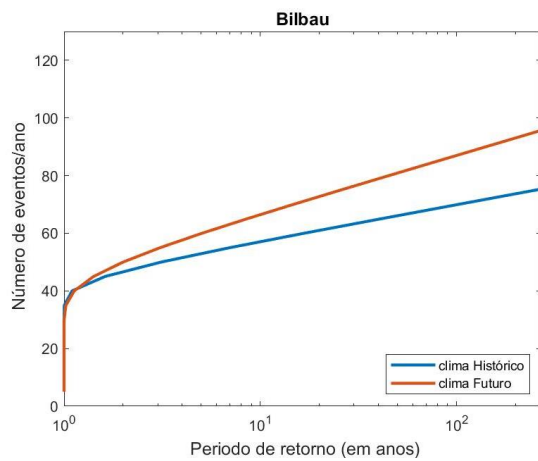
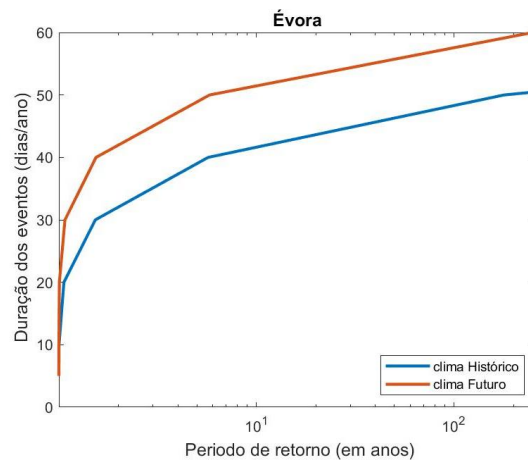
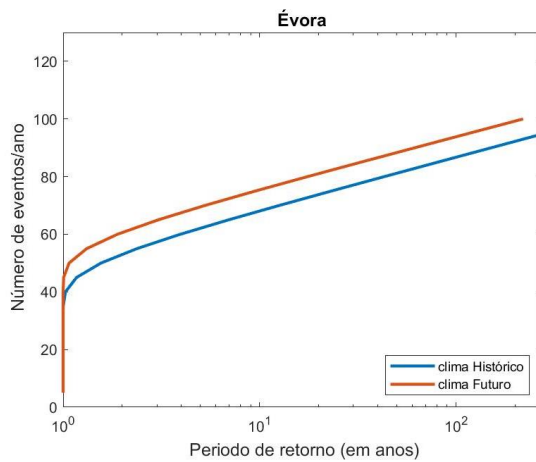
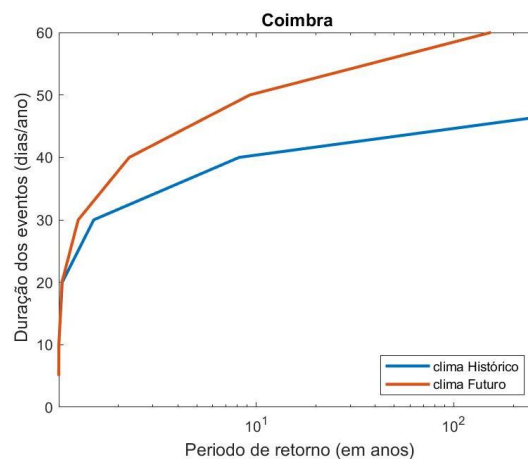
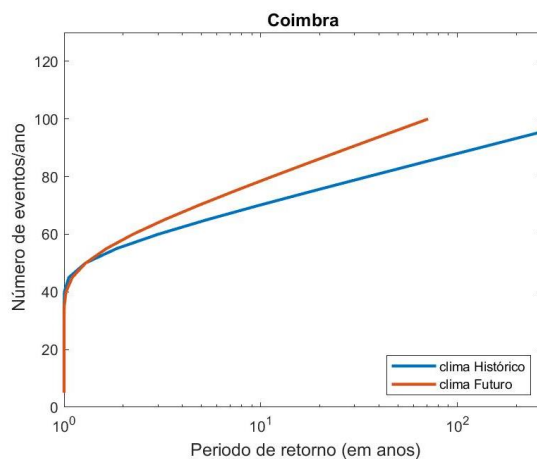
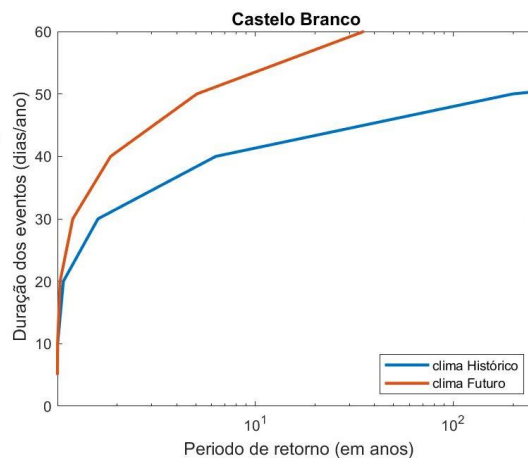
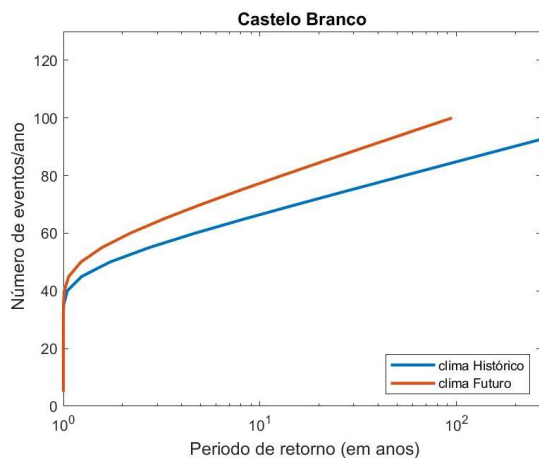
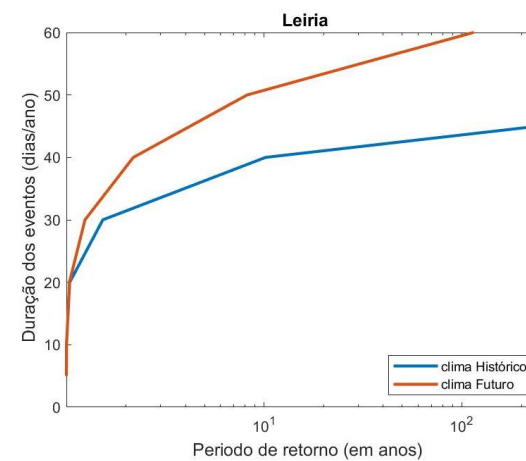
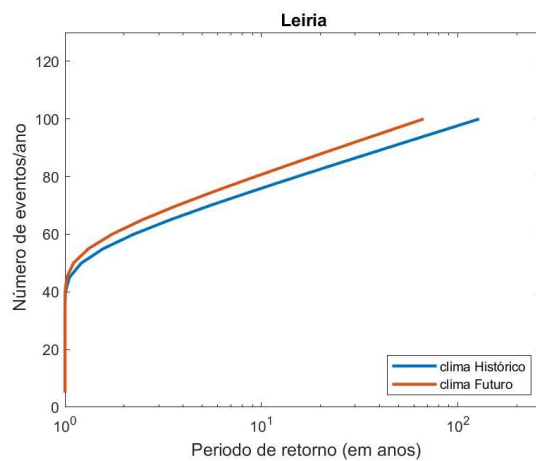
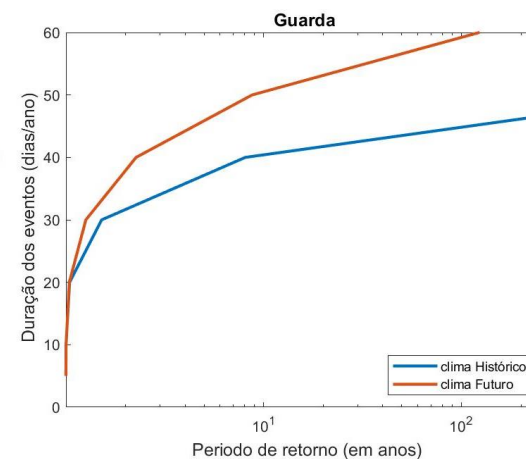
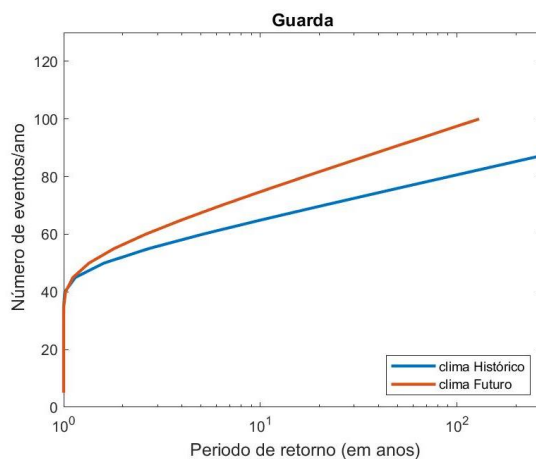
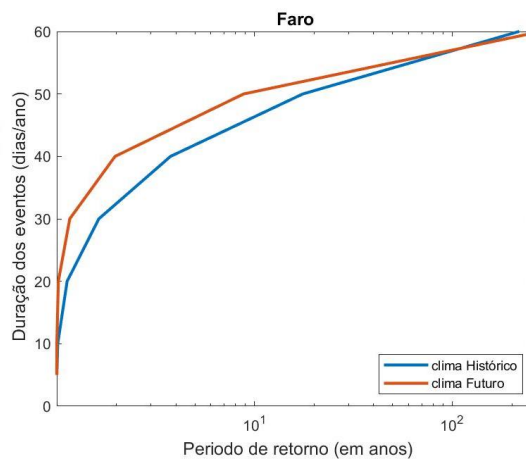
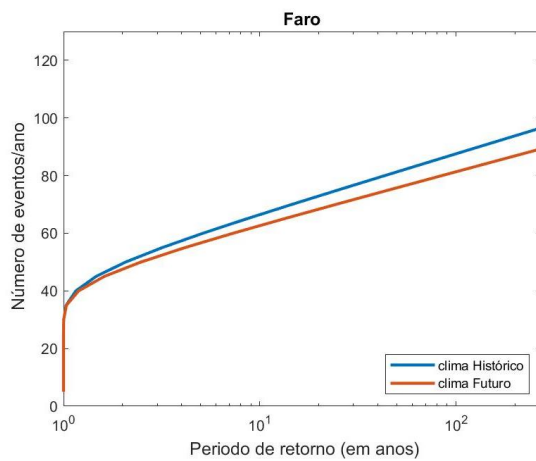


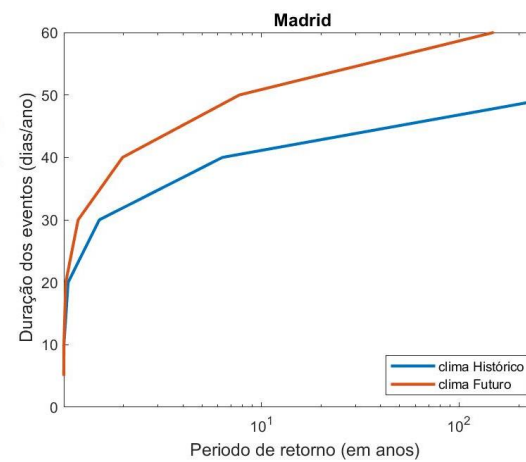
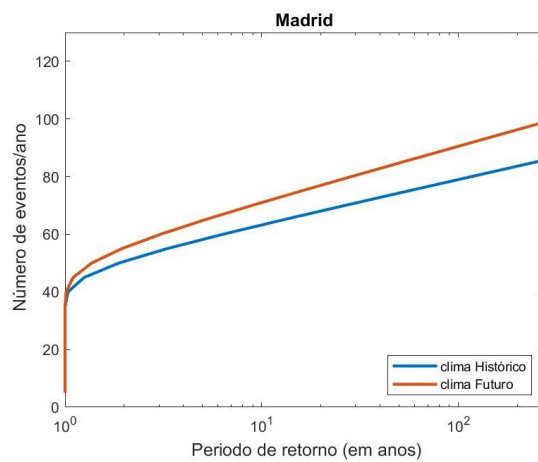
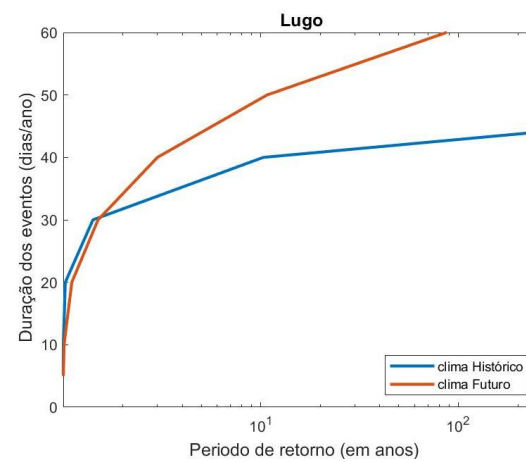
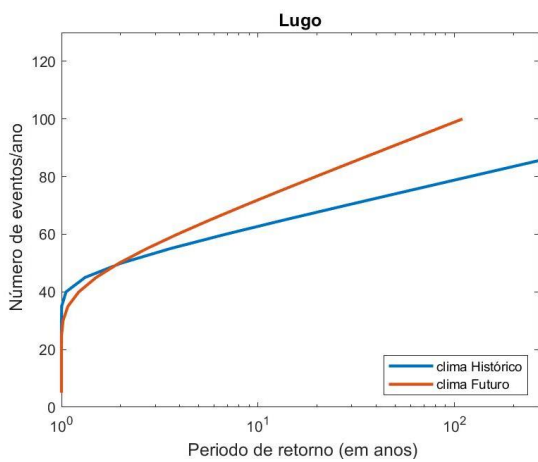
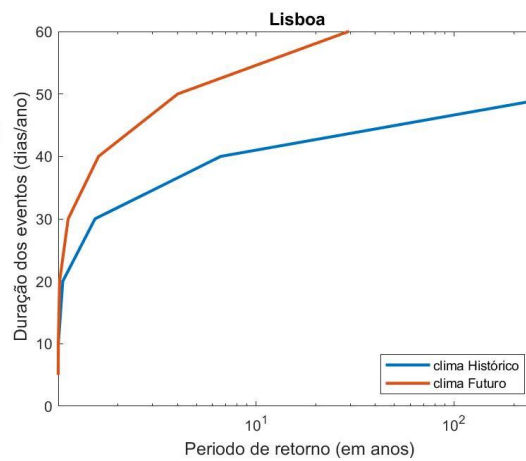
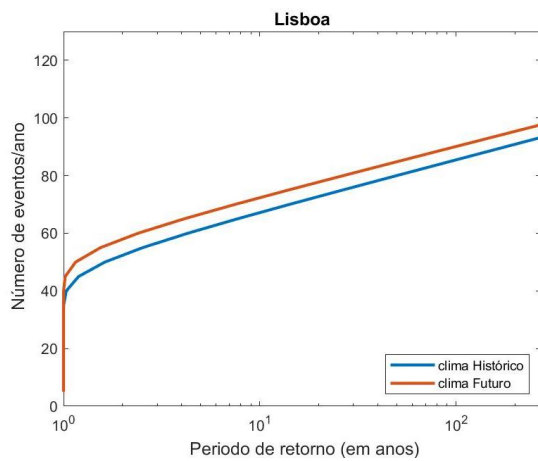
Figura A12 Período de retorno de eventos extremos dos climas histórico (azul) e futuro (vermelho) do número de eventos por ano (esquerda) e da duração dos evento (direita), para todas as cidades (exceto Vila Real), para a helicidade dos 0 aos 3 km.

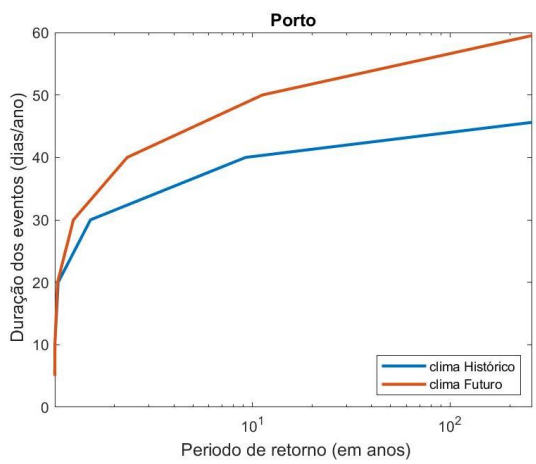
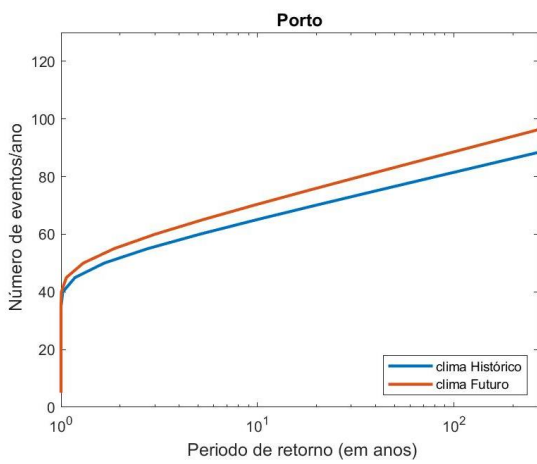
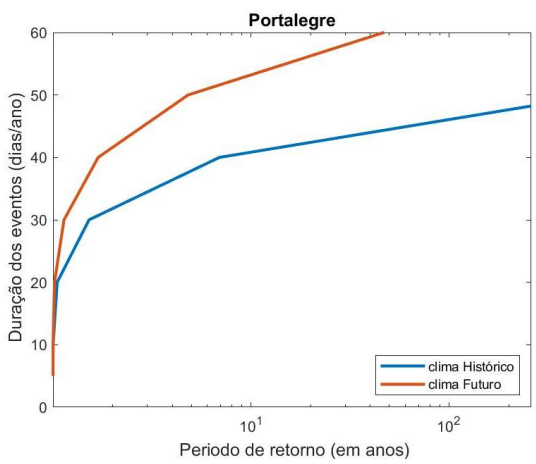
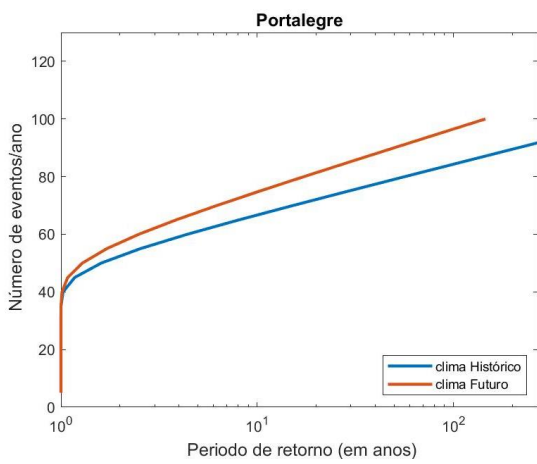
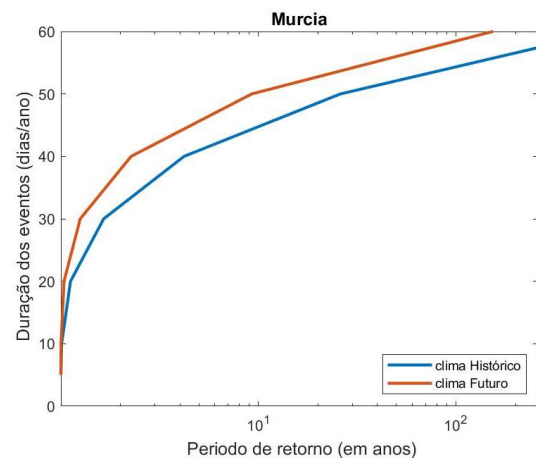
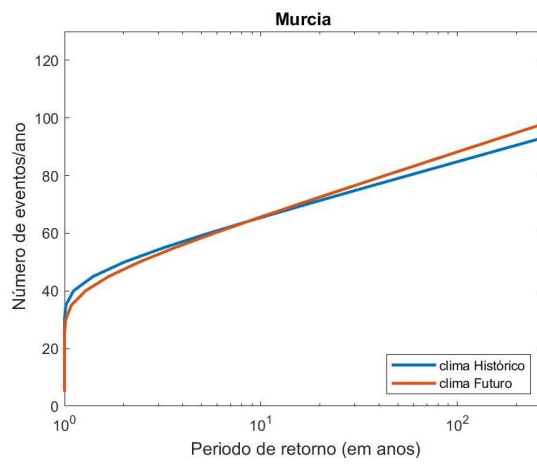


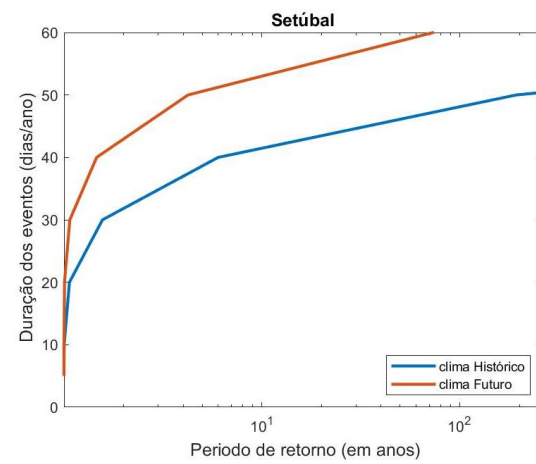
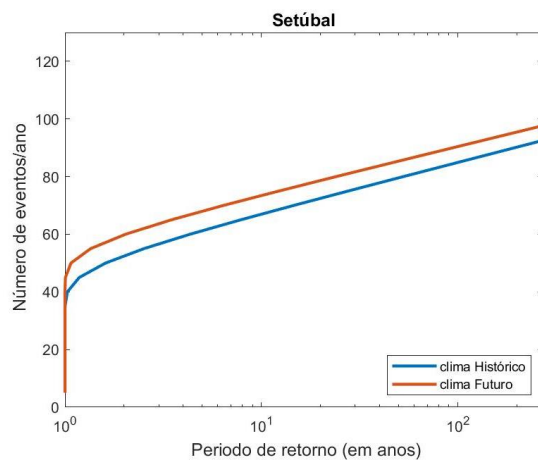
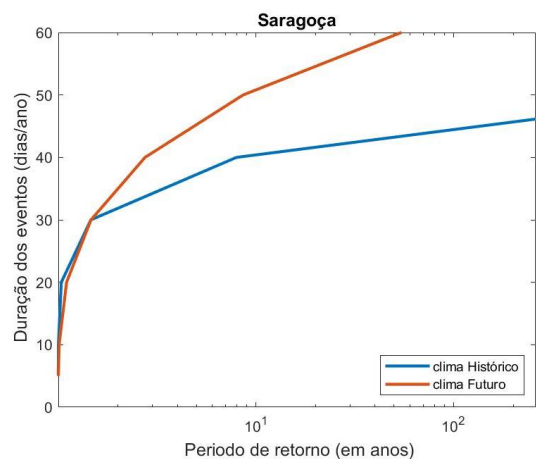
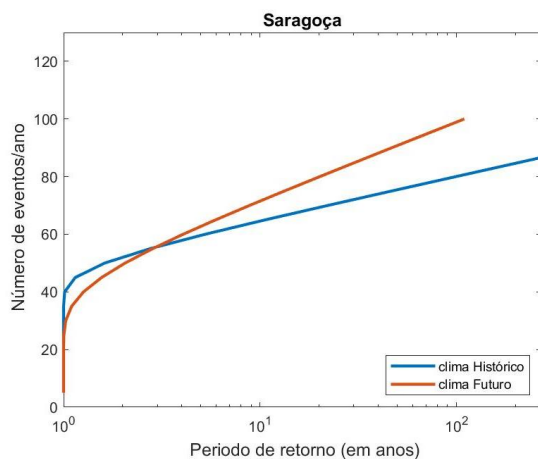
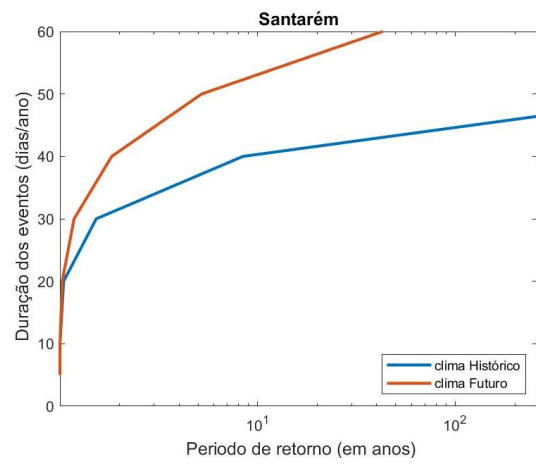
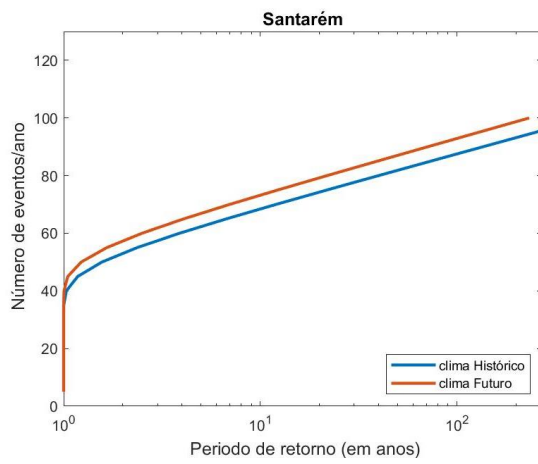


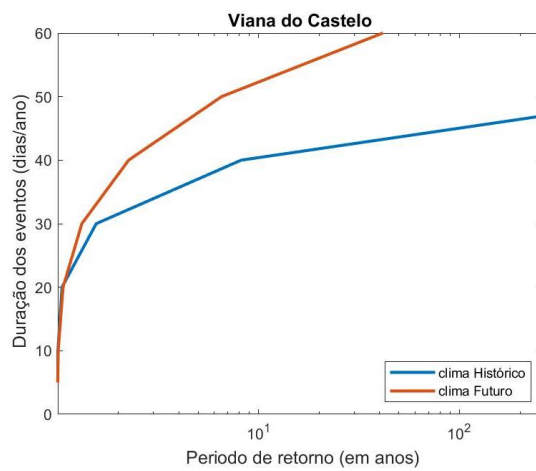
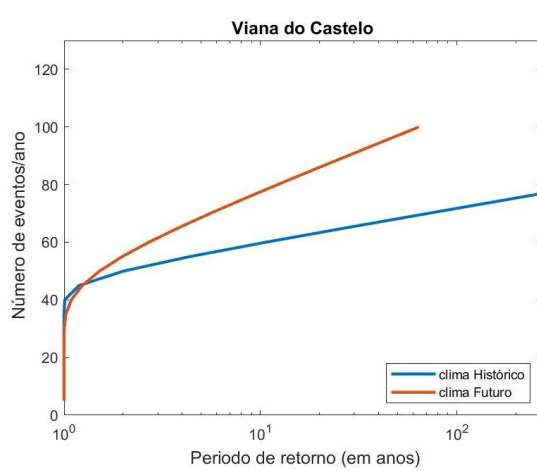
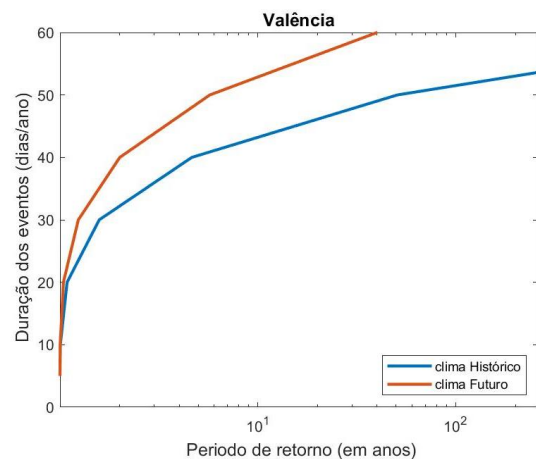
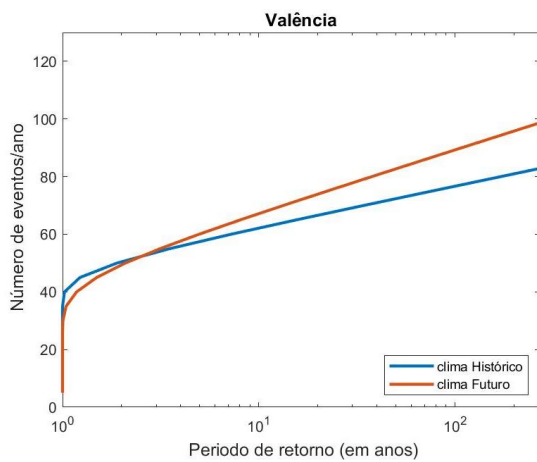
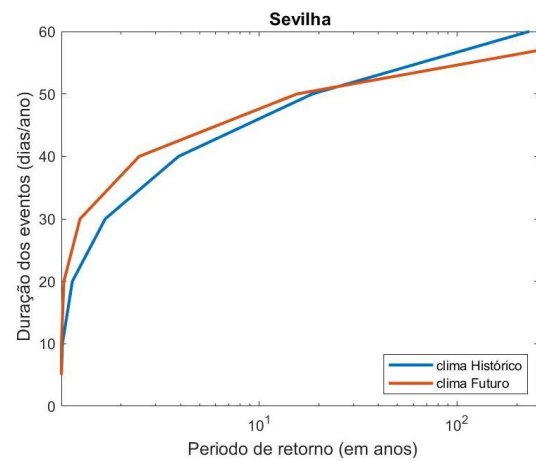
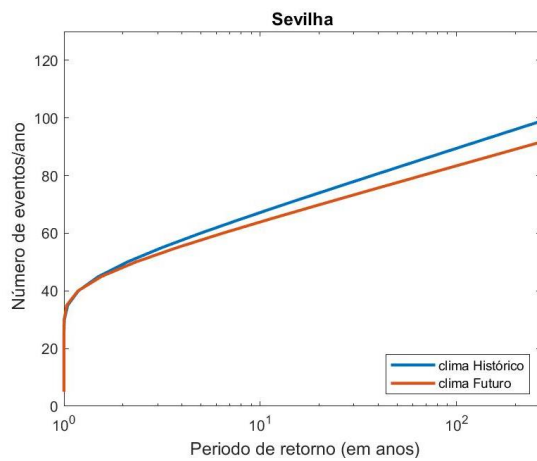


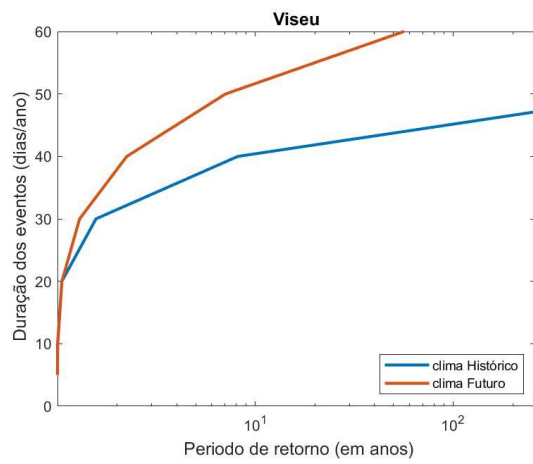
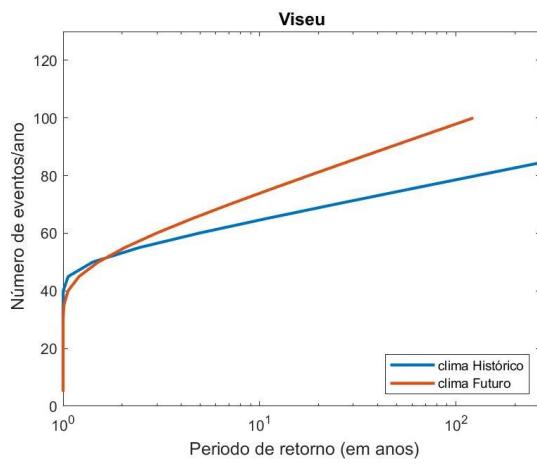












RIA – Repositório Institucional da Universidade de Aveiro

<http://ria.ua.pt>

Estes anexos só estão disponíveis para consulta através do CD-ROM.

Para consultar o CD-ROM deve dirigir-se ao balcão de atendimento da Biblioteca da UA.

Serviços de Biblioteca, Informação Documental e Museologia
Universidade de Aveiro